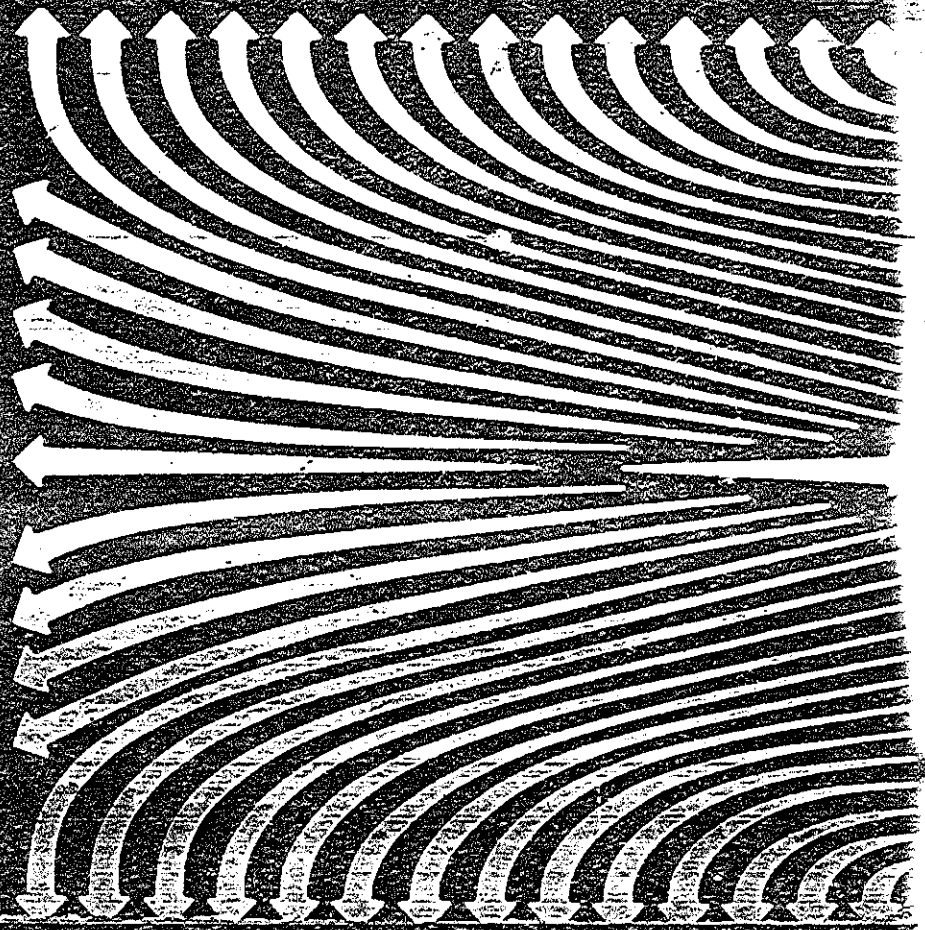
MATERIALES ELECTROTECNICOS

C.E.A.C

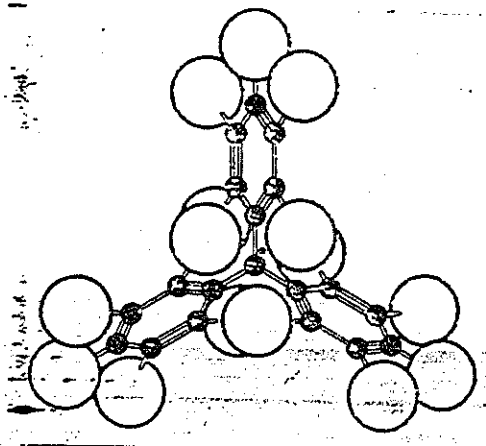


MATERIALES ELECTROTECNICOS

C.E.A.C

MATERIALES ELECTRO-TECNICOS

ENCICLOPEDIA CEAC DE ELECTRICIDAD



Indice

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MATERIALES CONDUCTORES

Definición de material conductor . . . 15
Conducción eléctrica 15
Propiedades generales de los materiales conductores 16
Propiedades eléctricas de los materiales conductores 17
Resistencia eléctrica de los materiales conductores 17
Resistividad eléctrica 18
Conductividad eléctrica 20
Variación de la resistencia con la temperatura 21
Constante de temperatura . . . 21
Coeficiente de temperatura . . . 22
La resistividad en función del coeficiente de temperatura 23
Variabilidad del coeficiente de temperatura 24
Coeficiente aparente de temperatura 25
Resistividad relativa y conductividad relativa 27
Propiedades mecánicas de los materiales conductores 28
Propiedades físico-químicas de los materiales conductores 30
Resumen de las características generales de los materiales conductores 35

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS MATERIALES CONDUCTORES

Generalidades 37
Resistencia de los materiales conductores para corrientes de alta frecuencia 37
Resistencias de contacto entre materiales conductores 39
Superconductividad 40

CAPÍTULO 3. MATERIALES CONDUCTORES

Generalidades 43
Cobre 43
Aleaciones de cobre 47
Latones 48
Bronces 49
Aluminio 53
Aleaciones de aluminio 56
Plata 57
Níquel 59
Aleaciones de níquel 60
Hierro y acero 66

Aleaciones de hierro 70
Carbón y grafito 72
Metales y aleaciones fusibles . . 77

CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MATERIALES AISLANTES

Conceptos generales 81
Propiedades generales de los materiales aislantes 82
Propiedades eléctricas de los materiales aislantes 83
Resistencia de aislamiento 83
Rigidez dieléctrica 85
Constante dieléctrica 87
Factor de pérdidas dieléctricas . . 88
Factor de potencia 91
Resistencia al arco 91
Ensayo de las propiedades eléctricas de los materiales aislantes 92
Propiedades mecánicas de los materiales aislantes 102
Ensayo de las propiedades mecánicas de los materiales aislantes 104
Propiedades físico-químicas de los materiales aislantes 112
Propiedades térmicas de los materiales aislantes 114
Propiedades químicas de los materiales aislantes 115
Clasificación de los materiales aislantes según la temperatura de servicio 119
Temperaturas límites de servicio de los materiales aislantes . . 123

CAPÍTULO 5. MATERIALES CERÁMICOS EMPLEADOS EN ELECTROTECNIA

Definición y propiedades generales 125
Clasificación de los materiales cerámicos 126
Porcelana electrotécnica 128
Loza electrotécnica 138
Esteatita 138
Materiales cerámicos a base de compuestos de titanio 140
Materiales cerámicos de reducido coeficiente de dilatación . . . 142
Materiales cerámicos porosos . . 145

CAPÍTULO 6. MATERIALES AISLANTES A BASE DE VIDRIO

Definición y características generales 149
Clasificación de los vidrios . . 151
Propiedades dieléctricas de los vidrios empleados en Electrotecnia 152
Aplicaciones del vidrio electrotécnico 154
Cuarzo fundido 155
Resumen de lo explicado 156
Esmalte vítreo 158
Fibra y tejido de vidrio 158
Materiales estratificados a base de fibra de vidrio 160
Zunchos de fibra de vidrio . . . 162

CAPÍTULO 7. MATERIALES AISLANTES A BASE DE MICA

Variedades de mica empleadas en Electrotecnia 165
Propiedades generales de la mica . 166
Calidades y aplicaciones de la mica pura 168
Limitaciones en el empleo de la mica pura 169
Conceptos generales sobre los materiales aislantes a base de mica 169
Materiales empleados como aglomerantes de la mica pura . . 170
Clasificación de los materiales aislantes a base de mica 171
Micanita 172
Micasin 173
Micarta 175
Micalex 175
Materiales aislantes a base de mica con soporte 176
Resumen final 178

CAPÍTULO 8. MATERIALES AISLANTES CELULÓSICOS Y TEXTILES

Conceptos generales 181
Madera 182

Fibra 187
Papel aislante 188
Papel impregnado con aceite . . 191
Papel baquelizado 192
Cartón aislante 195
Telas aislantes 197
Cintas aislantes 199
Estratificados a base de materias celulósicas 200
Resumen 201

CAPÍTULO 9. CONCEPTOS GENERALES SOBRE LOS MATERIALES PLÁSTICOS EMPLEADOS EN ELECTROTECNIA

Generalidades 203
Definición de material plástico . 203
Estructura general de un material plástico 204
Polimerización 209
Homopolímeros y copolímeros . 212
Despolimerización 214
Sustancias aditivas 215
Generalidades sobre la fabricación de los plásticos 216
Preparación de los plásticos . . 217
Procedimientos de fabricación de los plásticos 217
Fabricación de plásticos por moldeo 217
Fabricación de plásticos por calandrado 221
Fabricación de plásticos por revestimiento 222
Fabricación de plásticos por conformación 222
Aplicaciones de los plásticos en Electrotecnia 223

CAPÍTULO 10. ESTUDIO DE LOS MATERIALES PLÁSTICOS EMPLEADOS EN ELECTROTECNIA

Clasificación de los materiales plásticos 225
Materiales termoplásticos . . . 229
Caseína 229
Termoplásticos derivados de la celulosa 230
Resinas de cumarona 233
Resinas poliestirénicas 233
Polietileno 237
Resinas vinílicas 240
Policloruro de vinilo 245
Resinas acrílicas 250
Etileno-propileno 254
Policarbonatos 255
Poliamidas 255
Poliuretanos 258
Resinas fluoradas 258
Materiales termoestables 261
Resinas fenólicas 262
Resinas uréicas 270
Resinas de melamina 273
Resinas de anilina 275
Resinas alquídicas y de poliester . 278
Resinas epoxídicas 282
Plásticos magnéticos 296
Resumen general 306

CAPÍTULO 11. ELASTOMEROS EMPLEADOS EN ELECTROTECNIA

Definición y conceptos generales . 309
Estructura general de los elastómeros 310
Clasificación de los materiales elastómeros 312
Caucho natural 312
Caucho vulcanizado 315
Ebonita 323
Gutapercha y batalata 326
Otros elastómeros naturales . . . 328
Conceptos generales sobre los elastómeros sintéticos 330
Polímeros de diolefinas 331
Polímeros de monoolefinas . . . 335
Elastómeros obtenidos por policondensación 337
Resumen 337

CAPÍTULO 12. SILICONAS EMPLEADAS EN ELECTROTECNIA

Definición y conceptos generales . 343
Nomenclatura de los compuestos organosilícicos 344
Preparación de las siliconas . . . 347
Propiedades generales de las siliconas 352
Diferentes tipos de siliconas utilizados 354
Propiedades de las resinas de silicona 359

Propiedades de los fluidos y aceites de silicona . . . 361
Propiedades de los elastómeros de silicona . . . 363
Propiedades de los compounds de silicona . . . 367
Propiedades de las grasas de silicona . . . 368
Aplicaciones de las siliconas en Electrotecnia . . . 368
Resumen final . . . 376

CAPÍTULO 13. OTROS MATERIALES AISLANTES SÓLIDOS

Generalidades . . . 377
Amianto y materiales derivados . . . 377
Materiales aislantes bituminosos . . . 381
Ceras aislantes . . . 383
Resinas naturales . . . 387
Pizarra . . . 390
Mármol . . . 391

CAPÍTULO 14. MATERIALES AISLANTES LÍQUIDOS

Conceptos generales . . . 393
Propiedades eléctricas de los materiales aislantes líquidos . . . 394
Propiedades físico-químicas de los materiales aislantes líquidos . . . 396
Materiales aislantes líquidos empleados en Electrotecnia . . . 403
Aceites aislantes . . . 403
Aceites vegetales . . . 404
Aceites resinosos . . . 406
Aceites minerales . . . 406
Obtención y tratamiento de los aceites minerales . . . 408
Propiedades de los aceites minerales . . . 410
Factores que influyen en la variación de las propiedades eléctricas de los aceites minerales . . . 417
Aplicación de los aceites minerales como aislantes de cables . . . 421
Aplicación de los aceites minerales como aislantes de interruptores . . . 422
Aplicación de los aceites minerales como aislantes de transformadores . . . 422
Aplicación de los aceites minerales como dieléctricos de condensadores . . . 423
Resumen de aplicaciones de los aceites minerales . . . 424
Aceites minerales mezclados con resinas . . . 425
Aceites sintéticos aislantes . . . 425
Estudio de un aceite sintético aislante: el Pyralene . . . 427
Fluidos y aceites de silicona . . . 435
Tetracloruro de carbono . . . 433
Agua pura . . . 436

CAPÍTULO 15. MATERIALES AISLANTES GASEOSOS

Propiedades eléctricas de los gases . . . 439
Constante dieléctrica de los gases . . . 441
Descarga eléctrica en los gases . . . 441
Ley de Paschen . . . 443
Rigidez dieléctrica de los gases . . . 445
El aire como dieléctrico . . . 446
El vacío como dieléctrico . . . 452
El gas hexafluoruro de azufre . . . 453

CAPÍTULO 16. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS

Campo magnético . . . 459
Fuerza magnetomotriz . . . 459
Intensidad del campo magnético . . . 460
Flujo magnético . . . 460
Inducción magnética . . . 461
Inducción normal . . . 462
Inducción intrínseca . . . 462
Inducción de saturación . . . 462
Permeabilidad magnética . . . 463
Susceptibilidad magnética . . . 464
Permeancia . . . 464
Reluctividad y reluctancia . . . 464
Remanencia . . . 465
Inducción residual . . . 465
Retentividad . . . 465
Fuerza coercitiva . . . 466
Energía externa de un material magnético . . . 466
Pérdidas magnéticas . . . 467
Envejecimiento de los materiales magnéticos . . . 468
Curvas de características magnéticas . . . 468
Efecto de la temperatura sobre las propiedades magnéticas . . . 476
Efecto de los esfuerzos mecánicos sobre las propiedades magnéticas . . . 477
Magnetostricción . . . 477
Efecto de la frecuencia sobre las propiedades magnéticas . . . 479
Clasificación de los materiales magnéticos . . . 480

CAPÍTULO 17. MATERIALES MAGNÉTICOS

Materiales ferromagnéticos . . . 483
Metales ferromagnéticos . . . 484
Aleaciones ferromagnéticas . . . 485
Materiales magnéticamente blandos . . . 486
Aleaciones hierro-carbono magnéticamente blandas . . . 488
Aleaciones hierro-silicio . . . 490
Aleaciones hierro-silicio de grano orientado . . . 499
Aleaciones hierro-níquel . . . 501
Aleaciones hierro-cobalto . . . 511
Aleaciones hierro-níquel-cobalto . . . 512
Aleaciones hierro-aluminio . . . 513
Materiales magnéticamente blandos, a base de polvos aglomerados . . . 514
Resumen de los materiales magnéticamente blandos . . . 515
Características generales de los materiales magnéticamente duros . . . 515
Propiedades que deben reunir los materiales para imanes permanentes . . . 519
Materiales empleados en la construcción de imanes permanentes . . . 523
Aceros para imanes permanentes . . . 524
Aleaciones especiales para imanes permanentes . . . 528
Materiales cerámicos para imanes permanentes . . . 533
Resumen de los materiales magnéticamente duros . . . 535

1 Características generales de los materiales conductores

Definición de material conductor

Se denomina *conductor* a todo material que permite el paso continuo de una corriente eléctrica, cuando está sometido a una diferencia de potencial eléctrico. Para una diferencia de potencial determinada, cuanto mayor es la densidad de la corriente, tanto más eficiente es el conductor.

Virtualmente, todos los materiales en estado sólido o líquido tienen propiedades conductoras, pero ciertos materiales son relativamente mejores desde este punto de vista, mientras que otros están casi totalmente desprovistos de esta propiedad. Por ejemplo, los metales son los mejores conductores, mientras que otras sustancias como óxidos y sales metálicas, minerales, materias fibrosas, etc., tienen conductividad relativamente baja que, no obstante, es afectada favorablemente por la absorción de la humedad. Hay ciertos materiales poco conductores, como el carbón y determinadas aleaciones, que también tienen interés electrotécnico.

Conducción eléctrica

Se puede definir la conducción eléctrica como el movimiento de cargas eléctricas en el espacio. La conductividad eléctrica de los materiales varía entre amplios límites: para un material considerado buen

conductor, como la plata, vale 10^6 siemens-cm, mientras que para un material aislante, como la parafina, es del orden de 10^{-18} siemens-cm.

La conductividad eléctrica puede ser de dos clases:

a) *Conducción electrónica.* En este caso, los portadores de cargas son los electrones libres. En ausencia de campo electromagnético exterior, el movimiento electrónico es desordenado; la superposición de un campo electromagnético exterior provoca una orientación de los electrones hacia el polo positivo del campo aplicado.

b) *Conducción iónica.* En este caso, los portadores de cargas son los átomos ionizados, es decir, átomos a los que faltan electrones (carga positiva) o a los que sobran electrones (carga negativa). En ausencia de campo electromagnético exterior, el movimiento de los iones es el resultado de la agitación térmica y, por lo tanto, entre ellos se producen choques y frenados, en movimientos desordenados. Al aplicar un campo electromagnético exterior, el movimiento de los iones queda orientado en el sentido de un polo, según sea su carga. La conductividad iónica aumenta con la temperatura ya que ésta aumenta la movilidad de los iones; el campo electromagnético exterior es la causa de la orientación de los movimientos iónicos.

Naturalmente, la orientación de los movimientos, electrónicos o iónicos, serán tanto más acusados cuanto más intenso sea el campo electromagnético exterior aplicado. Los movimientos electrónicos serán mucho más rápidos que los iónicos, ya que el electrón tiene una masa mucho menor que la del átomo ionizado y, por lo tanto, una inercia que es también mucho menor.

Propiedades generales de los materiales conductores

Estas propiedades se pueden clasificar en tres grupos:

a) Propiedades eléctricas.
b) Propiedades mecánicas.
c) Propiedades físico-químicas.

Naturalmente, las propiedades eléctricas son las más interesantes para el electrotécnico. Pero no deben olvidarse las restantes propiedades citadas, ya que de nada servirá un material buen conductor de la corriente eléctrica si no pudiera resistir los esfuerzos mecánicos sin romperse, o los calentamientos sin descomponerse.

Propiedades eléctricas de los materiales conductores

Las propiedades eléctricas que han de tenerse en cuenta para determinar la calidad de los materiales conductores, son las siguientes:

a) Resistencia eléctrica.
b) Resistividad.
c) Conductividad.

Resistencia eléctrica de los materiales conductores

La *resistencia eléctrica* R, de un material conductor constituye un índice de la oposición que ofrece el paso de la corriente eléctrica.

Se define como la relación entre la tensión constante U, aplicada a sus extremos y la corriente permanente I que circula por el conductor, es decir, que se trata de un coeficiente de proporcionalidad entre ambas magnitudes, expresado por

$$R = \frac{U}{I}$$

Para un material conductor determinado, la resistencia R es, en general, independiente de la tensión aplicada U y de la corriente I que pasa por el circuito formado con ese conductor; es, en realidad, un parámetro que depende de la naturaleza y dimensiones del material considerado.

En conductores de sección uniforme, relativamente pequeña respecto a su longitud, la resistencia es directamente proporcional a la longitud l e inversamente proporcional a la sección s, de forma que puede expresarse por

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

en la que ρ es el coeficiente de proporcionalidad, distinto para cada material conductor y denominado *resistividad*, como se verá más adelante.

La unidad práctica de resistencia es el *ohmio* (Ω), definido como la resistencia eléctrica de un circuito recorrido por la corriente de 1 amperio, con la diferencia de potencial de 1 voltio. Para resistencias muy pequeñas, se emplea un submúltiplo, denominado *microhmio* siendo

$$1 \text{ microhmio} = 1\ \mu\Omega = 10^{-6} \text{ ohmios}$$

Para resistencias muy grandes, se emplea el múltiplo denominado *megohmio*, siendo

$$1 \text{ megohmio} = 1 \text{ M}\Omega = 10^6 \text{ ohmios}$$

La magnitud inversa de la resistencia se denomina *conductancia*, y está definida por

$$G = \frac{I}{U}$$

Siendo su unidad el *siemens*, o conductancia de un circuito recorrido por la corriente de 1 amperio, bajo la diferencia de potencial de 1 voltio.

En los países anglosajones, la unidad de conductancia es el mho, siendo

$$1 \text{ mho} = 1 \text{ siemens}$$

Resistividad eléctrica

La *resistividad eléctrica* o *resistencia específica* es la medida de la resistencia eléctrica de una cantidad unidad de un material dado. Si la resistividad se refiere a las unidades de superficie y de longitud, se trata de resistividad volumétrica, que es la más utilizada como característica típica de los materiales conductores. La expresión de la resistividad volumétrica se deduce de la fórmula que expresa la resistencia eléctrica

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

de donde

$$\rho = \frac{Rs}{l}$$

Si R se mide en ohmios, s en milímetros cuadrados y l en metros, la resistividad queda expresada en ohmios por milímetros cuadrado y por metro, es decir

$$\rho = \frac{\Omega \times mm^2}{m}$$

esta expresión de la resistividad volumétrica es la generalmente empleada para conductores metálicos. Volviendo a la expresión general de la resistencia y adoptando las unidades anteriores:

$$R(\Omega) = \rho \frac{(\Omega \times mm^2)}{m} \frac{l\,(m)}{s\,(mm^2)}$$

se deduce que la resistividad ρ es igual a la resistencia en Ω de un hilo de 1 m de longitud y 1 mm² de sección.

Para los cuerpos muy buenos conductores, de superficie bastante grande (por ejemplo, los electrolitos), la resistencia R se mide en microhmios, s en centímetros cuadrados y l en centímetros; en este caso, la resistividad ρ queda expresada en microhmios por centímetro cuadrado por centímetro, es decir

$$\rho = \frac{\mu\,\Omega \times cm^2}{cm}$$

Volviendo a la expresión general de la resistencia y aplicando las correspondientes unidades

$$R(\Omega) = \rho \frac{(\mu\,\Omega \times cm^2)}{cm} \frac{l\,(m)}{s\,(mm^2)}$$

resulta que, en este caso, ρ es la resistencia en $\mu\,\Omega$ de un cubo de 1 cm de arista.

Entre ambas resistividades, existe la siguiente relación:

$$\rho \left(\frac{\mu\,\Omega \times cm^2}{cm}\right) = \rho \frac{(\Omega \times 10^6)\,(mm^2 \times 10^{-2})}{(m \times 10^2)} =$$

$$= \rho \left(\frac{\Omega \times mm^2}{m}\right) 100$$

Por ejemplo, la resistividad del cobre es

$$\rho = 0{,}017241 \frac{\Omega \times mm^2}{m}$$

o, también

$$\rho = 1{,}7241 \frac{\mu\,\Omega \times cm^2}{cm}$$

Algunas veces se utiliza también la *resistividad de masa* referida a unidades de masa y expresada por:

$$\delta = \frac{R\ m}{l^2}$$

R = resistencia
m = masa
l = longitud

Generalmente, la resistividad de masa se expresa en ohmios por gramo y por centímetro cuadrado, es decir

$$\delta = \frac{\Omega \times g}{cm^2}$$

Conductividad eléctrica

La *conductividad eléctrica* $\varkappa$ es la inversa de la resistividad, definida anteriormente, y está expresada por

$$\varkappa = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{R\,s}$$

A la unidad de resistividad

$$\rho = 1\ \frac{\Omega \times mm^2}{m}$$

corresponde como unidad de conductividad

$$\varkappa = 1\ \frac{S \times m}{mm^2}$$

y es la que normalmente se emplea para esta magnitud. Para los materiales conductores usuales, el orden de esta magnitud es de varias decenas: por ejemplo, la resistividad del cobre a 20° C es

$$\rho = 0{,}017241\ \frac{\Omega \times mm^2}{m}$$

y su conductividad vale

$$\varkappa = \frac{1}{0{,}017241} = 58\ \frac{S \times m}{mm^2}$$

A veces, resulta muy práctico escribir el valor de la resistividad como expresión inversa de la conductividad (por ejemplo, para el cálculo de líneas eléctricas). Así, para el cobre a 20° C

$$\rho = \frac{1}{58}\ \frac{\Omega \times mm^2}{m}$$

Variación de la resistencia con la temperatura

Según la clase de materiales empleados, la resistencia eléctrica varía de distinta forma al aumentar la temperatura:

a) la resistividad del cobre, del aluminio y, en general, de casi todos los materiales metálicos aumenta, si aumenta la temperatura.

b) industrialmente, se consiguen ciertas aleaciones de cobre y níquel, algunas veces con adición de otras sustancias (por ejemplo, manganeso), cuya resistividad es prácticamente independiente de la temperatura (nombres comerciales de estos materiales: constantan, advance, manganina, etc.).

c) el carbono, sus derivados y casi todos los materiales aislantes en estado seco, presentan el fenómeno inverso, es decir, que su resistividad disminuye al aumentar la temperatura.

Dada la influencia que tiene la temperatura t, sobre los valores de la resistividad y de la conductividad, se acostumbra a hacer constar aquélla mediante un subíndice añadido al símbolo correspondiente: así, ρ_{20} significa la resistividad a 20° C.

Constante de temperatura

Experimentalmente se ha comprobado que el incremento de resistividad de un material conductor, por cada grado de aumento de la temperatura, es una *constante* c del material, independiente de la re-

sistividad inicial de la muestra, de la temperatura inicial y de la calidad de la muestra. Por ejemplo, para el cobre

$$c = 68 \times 10^{-6} \frac{\left(\frac{\Omega \times mm^2}{m}\right)}{°C}$$

lo que quiere decir que la resistencia de un conductor de cobre de 1 m de longitud y 1 mm² de sección constantes, para cualquier calidad electrotécnica y a cualquier temperatura, aumenta 68 μ Ω por cada °C.

La expresión matemática de esta ley es:

$$\rho_{t2} = \rho_{t1} + c\,(t_2 - t_1)$$

ρ_{t2} = resistividad a la temperatura t_2 °C
ρ_{t1} = resistividad a la temperatura t_1 °C

La representación gráfica de

$$\rho = f\,(t)$$

es lineal, tal como puede apreciarse en la figura 1.

Coeficiente de temperatura

Si al variar la temperatura de un conductor desde t_1 a t_2 °C, su resistividad aumenta desde ρ_{t1} a ρ_{t2}, se define el *coeficiente de temperatura medio* $\alpha_{\rho t1}$, a partir de t_1 °C, como la variación c de resistividad por grado centígrado, referida al valor inicial de ρ, es decir, a ρ_{t1}. Matemáticamente, el valor del coeficiente de temperatura medio está expresado por

$$\alpha_{\rho t1} = \frac{c}{\rho_{t1}} = \frac{\left(\frac{\rho_{t2} - \rho_{t1}}{t_2 - t_1}\right)}{\rho_{t1}}$$

Aunque la constante de temperatura c, es independiente de la calidad de la muestra, el coeficiente de temperatura resulta, en cambio, inversamente proporcional a la resistividad inicial ρ_{t1}, e independiente de la temperatura final t_2. Si llamamos χ_{t1} a la conductividad inicial, resulta la siguiente expresión

$$\alpha_{\rho t1} = \frac{c}{\rho_{t1}} = c\,\chi_{t1}$$

La resistividad en función del coeficiente de temperatura

De la fórmula expresada anteriormente

$$\rho_{t2} = \rho_{t1} + c\,(t_2 - t_1)$$

se deduce

$$\rho_{t2} = \rho_{t1}\left[1 + \frac{c}{\rho_{t1}}\,(t_2 - t_1)\right]$$

y recordando que

$$\alpha_{\rho t1} = \frac{c}{\rho_{t1}}$$

tendremos, finalmente

$$\rho_{t2} = \rho_{t1}\,[1 + \alpha_{\rho t1}\,(t_2 - t_1)]$$

que es una fórmula muy importante y de múltiples aplicaciones. Si se toman como base las características del material a 20° C, que es la temperatura de referencia para la normalización de las propiedades de los materiales conductores, resulta

$$\rho_{t2} = \rho_{20}\,[1 + \alpha_{\rho 20}\,(t_2 - 20)]$$

$$\rho_{t1} = \rho_{20}\,[1 + \alpha_{\rho 20}\,(t_1 - 20)]$$

de donde

$$\frac{\rho_{t1}}{\rho_{t2}} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha_{\rho 20}} - 20\right) + t_2}{\left(\frac{1}{\alpha_{\rho 20}} - 20\right) + t_1}$$

Recordando que

$$\alpha_{\rho 20} = c\,\chi_{20} = 68 \times 10^{-6} \times 58 = \frac{1}{253{,}55}$$

y sustituyendo en la fórmula anterior

$$\frac{\rho_{t2}}{\rho_{t1}} = \frac{(253{,}55 - 20) + t_2}{(253{,}55 - 20) + t_1} = \frac{\alpha_{pt1}}{\alpha_{pt2}}$$

es decir que

$$\frac{\rho_{t2}}{\rho_{t1}} = \frac{233{,}55 + t_2}{233{,}55 + t_1}$$

Variabilidad del coeficiente de temperatura

La relación fundamental que define el coeficiente de temperatura es, como hemos visto

$$\alpha_{pt1} = \frac{c}{\rho_{t1}}$$

Para la temperatura ambiente normalizada, de 20° C, tendremos que

$$\alpha_{p20} = \frac{c}{\rho_{20}}$$

y, por lo tanto

$$\frac{\alpha_{pt1}}{\alpha_{p20}} = \frac{\rho_{20}}{\rho_{t1}} = \frac{1}{1 - \alpha_{p20}\,(t_1 - 20)}$$

de donde

$$\alpha_{pt1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{p20}} - 20\right) + t_1}$$

pero, según se ha visto en el parágrafo anterior

$$\alpha_{pt1} = \frac{1}{(253{,}55 - 20) + t_1} = \frac{1}{233{,}55 + t_1} = \frac{1}{T_{p0} + t_1} = \frac{1}{T_p}$$

siendo

$$T_{p0} = 233{,}55° C$$

Teóricamente, para una temperatura $-T_{p0}$, la resistividad se anula, ya que

$$\rho_{t2} = \rho_{t1}\left[1 + \alpha_{pt1}\,(t_2 - t_1)\right] =$$

$$= \rho_{t1}\left[1 + \frac{1}{T_{p0} + t_1}\,(-T_{p0} - t_1)\right] = 0$$

Volveremos sobre esta cuestión más adelante, al hablar de la superconductividad.

Coeficiente aparente de temperatura

La expresión general de la resistencia de un material conductor es

$$R = \rho\,\frac{l}{s}$$

La resistencia varía en la misma relación que ρ, si l y s permanecieran constantes o variasen proporcionalmente con la temperatura. Pero las dilataciones térmicas, longitudinal y transversal, del material conductor, modifican la relación l/s y, por este lado, queda también alterado el valor de R. Designando por β_o el coeficiente de dilatación lineal a 0° C, se puede expresar

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{\rho_{t2}}{\rho_{t1}}\,\frac{l_{t2}}{l_{t1}}\,\frac{s_{t1}}{s_{t2}} =$$

$$= \frac{\rho_{t2}}{\rho_{t1}}\,\frac{1 + \beta_o\,t_2}{1 + \beta_o\,t_1}\,\frac{(1 + \beta_o\,t_1)^2}{(1 + \beta_o\,t_2)^2} =$$

$$= \frac{\rho_{t2}}{\rho_{t1}}\,\frac{1 + \beta_o\,t_1}{1 + \beta_o\,t_2}$$

Como el coeficiente de dilatación β_o es muy pequeño queda que

$$\frac{1 + \beta_o\,t_1}{1 + \beta_o\,t_2} \simeq 1 - \beta_o\,(t_2 - t_1)$$

con lo que se tiene

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \left[1 + \alpha_{pt1}\,(t_2 - t_1)\right]\left[1 - \beta_o\,(t_2 - t_1)\right] \approx$$

$$\approx \left[1 + (\alpha_{pt1} - \beta_o)\,(t_2 - t_1)\right]$$

Si designamos por *coeficiente aparente de temperatura* α_{t1} a la expresión

$$\alpha_{t1} = \alpha_{pt1} - \beta_o$$

obtendremos para las resistencias, una expresión matemática idéntica a la de las resistividades

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = 1 + \alpha_{t1}\,(t_2 - t_1)$$

o, referidas a la temperatura de 0° C

$$R_{t2} = R_o\,(1 + \alpha_o\,t_2)$$

$$R_{t1} = R_o\,(1 + \alpha_o\,t_1)$$

de donde puede deducirse

$$\frac{R_{t2}}{R_{t1}} = \frac{1 + \alpha_o\,t_2}{1 + \alpha_o\,t_1} = \frac{\dfrac{1}{\alpha_o} + t_2}{\dfrac{1}{\alpha_o} + t_1} = \frac{T_o + t_2}{T_o + t_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

y para

$$T_o = \frac{1}{\alpha_o}$$

se obtendrá, para el cobre $\left(\beta_o = 17 \cdot 10^{-6}\ \dfrac{m}{m\,°C}\right)$:

$$T_o = \frac{1}{\alpha_o} = \frac{1}{\alpha_{po} - \beta_o} = \frac{1}{\dfrac{1}{233{,}55} - 17 \cdot 10^{-6}} = 234{,}5\ °C$$

Estas ecuaciones también sirven para deducir el calentamiento de un conductor, por la medición de sus resistencias en frío y en caliente.

$$t_2 - t_1 = \frac{\dfrac{R_{t2}}{R_{t1}} - 1}{\alpha_{t1}} \approx \left(\frac{R_{t2}}{R_{t1}} - 1\right)(235 - t_1)\ °C\ (\textit{para el cobre})$$

Cuando se trata de medir por este procedimiento, que es el más recomendado, el calentamiento de los conductores sobre el ambiente, como los ensayos duran generalmente varias horas y la temperatura ambiente puede haber cambiado en ese intervalo de tiempo hay que deducir, del incremento así obtenido, la variación de dicha temperatura.

Si al comenzar la prueba, el ambiente estaba a una temperatura t' y al terminar esta prueba, la temperatura ambiental es de t'', el verdadero incremento de temperatura del conductor es

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \left(\frac{R_{t2}}{R_{t1}} - 1\right)(235 + t_1) - (t'' - t')\ °C$$

Resistividad relativa y conductividad relativa

Las características que sirven de base para las transacciones comerciales de los materiales conductores son los valores relativos de su resistividad o de su conductividad, respecto de la del cobre patrón a la temperatura normal de 20° C. Estos valores relativos se expresan generalmente en tanto por uno. Por ejemplo, la conductividad del cobre a 75° C, es de 56 $\dfrac{S \cdot m}{mm^2}$ y, por lo tanto, su conductividad relativa a 20° C es

$$\varkappa'_{20} = \frac{56}{58} = 0{,}965$$

Para determinar la conductividad relativa basta medir la resistencia R_{t1} (Ω) de una probeta del material, a cualquier temperatura t_1 y determinar las dimensiones l (m) y s (mm²) de la probeta. El valor de la conductividad relativa $\varkappa'_{20}$ viene entonces determinado por

$$\varkappa'_{20} = \frac{0{,}01724}{\rho_{t1} + (\rho_{t1} \cdot \alpha_{pt1})\,(20 - t_1)}$$

y el valor de la resistividad relativa ρ'_{20} será

$$\rho'_{20} = 58 \left[\rho_{t1} + (\rho_{t1}\ \alpha_{\rho t1})\ (20 - t_1) \right]$$

Propiedades mecánicas de los materiales conductores TODO

Además de sus propiedades eléctricas, los materiales conductores empleados en Electrotecnia han de poseer cierto número de propiedades mecánicas, que permitan un empleo adecuado a los fines propuestos con su utilización entre los que, a continuación, se definen los más importantes.

Los materiales conductores están sometidos a esfuerzos mecánicos de tracción, compresión, flexión y cortadura. Se definen:

Coeficiente de trabajo a la tracción

$$\sigma_t = \frac{F_t}{s} \quad kg/mm^2$$

F_t = esfuerzo o carga de tracción que el material puede resistir con seguridad, en kg
s = sección normal a la carga, en mm²

Coeficiente de trabajo a la compresión

$$\sigma_c = \frac{F_c}{s} \quad kg/mm^2$$

F_c = esfuerzo o carga de compresión que el material puede resistir con seguridad en kg
s = sección normal a la carga, en mm²

Coeficiente de trabajo a la flexión

$$\sigma_f = \frac{F_f}{s} \quad kg/mm^2$$

F_f = esfuerzo o carga de flexión que el material puede resistir con seguridad, en kg.
s = sección normal a la carga, en mm².

Coeficiente de trabajo a la cortadura

$$\sigma_{co} = \frac{F_{co}}{s} \quad kg/mm^2$$

F_{co} = esfuerzo o carga de cortadura que el material puede resistir con seguridad, en kg
s = sección normal a la carga, en mm²

Todos los materiales se deforman en mayor o menor grado cuando se someten a estos esfuerzos mecánicos. Estas deformaciones pueden ser *elásticas y permanentes*. La deformación se llama elástica cuando el material vuelve a su forma y dimensiones originales, una vez suprimido el esfuerzo, y permanente, en caso contrario.

El esfuerzo que produce la aparición de una deformación permanente, se denomina *límite elástico de trabajo* o *límite de elasticidad;* por debajo de este valor, el material es elástico y, en general, la deformación resulta proporcional al esfuerzo. El límite elástico acostumbra a expresarse en kg/mm².

Si se siguen aplicando a un material esfuerzos cada vez mayores por encima del límite elástico, llega un momento en que el material se rompe; el esfuerzo mínimo que produce la rotura se denomina *límite de rotura* o *carga de rotura* y se expresa también en kg/mm².

Como los materiales conductores se emplean generalmente en forma de alambres y de cables, las deformaciones producidas en estos materiales por los esfuerzos mecánicos, son alargamientos y acortamientos. La *ley de Hooke* expresa que, por debajo del límite elástico, hay proporcionalidades entre los alargamientos (o acortamientos), y los esfuerzos. Cuando se somete un material a esfuerzos de tracción hasta la rotura, el alargamiento que sufre el material se denomina *alargamiento a la rotura* y constituye un índice de la ductilidad del material; está expresado por

$$\Delta l = \frac{l - l_o}{s} \quad mm/mm^2$$

l = longitud a la que se produce la rotura, en mm
l_o = longitud inicial, en mm.
s = sección transversal, en mm²

El *módulo de elasticidad*, llamado también *módulo de Young*, es la relación entre el esfuerzo de tracción y el alargamiento producido por este esfuerzo. Es una característica propia del material, y está expresado por

$$M = \frac{F\,l}{s\,\Delta l} \quad kg/mm^2$$

F = esfuerzo de tracción, en kg
s = sección transversal inicial, en mm²
l = longitud inicial, en mm
Δl = alargamiento, en mm

Otra propiedad mecánica importante que debe considerarse en los materiales conductores es la *dureza* definida como la resistencia que ofrece un material a ser penetrado por otro cuerpo más duro.

Para el ensayo de dureza de los materiales más corrientes, se emplea el *método de Brinell*, utilizando una bolita de 10 mm de diámetro, de acero templado y muy duro que se obliga a penetrar en el metal de que se trate (por una fuerza de 3 000 kg para metales duros y de 500 kg para metales blandos), en dirección normal a la superficie de ensayo. Se llama *número de Brinell* o *coeficiente de dureza* a la relación P/s entre la carga o esfuerzo ejercido y la superficie del casquete esférico de penetración (huella de la bolita), expresada en mm^2.

También se utiliza el *método de Rockwell* en el que no se mide la superficie de la huella sino la profundidad de ésta; en este procedimiento, la bolita tiene 1,59 mm de diámetro.

Propiedades físico-químicas de los materiales conductores

Entre estas propiedades, cabe definir y aclarar los siguientes conceptos:

Peso específico y densidad. En un material cualquiera, el *peso específico* es el peso de la unidad de volumen, y *densidad* es la masa de la unidad de volumen. Entre el peso específico p y la densidad δ, existe la relación

$$p = g\,\delta$$

siendo g, la aceleración de la gravedad.

El peso específico y la densidad están expresados por el mismo número, pero en el caso del peso específico nos referimos a unidades de peso y en el caso de la densidad se hace referencia a unidades de masa. Por ejemplo, el cobre tiene un peso específico de 8,89 gramos-peso/cm^3 y también una densidad de 8,89 gramos-masa/cm^3.

El peso específico se expresa generalmente en gramos-peso/cm^3, en kilogramos-peso/dm^3 o en toneladas/m^3; algunas veces se emplean también los kilogramos-peso/m^3. La densidad se expresa casi siempre en gramos-masa/cm^3. Las unidades de peso específico y de densidad se refieren a una temperatura de 20° C.

Calor específico. El *calor específico medio* (C_m) de un material, entre dos límites de temperatura t_1 y t_2, es la relación que existe entre la cantidad de calor necesario Q, para elevar la unidad de masa del cuerpo de la temperatura t_1 a la temperatura t_2 y la elevación de temperatura $(t_2 - t_1)$, es decir, que está definido por la expresión

$$C_m = \frac{Q}{t_2 - t_1}$$

El *calor específico verdadero* c_v de un cuerpo a la temperatura t, es el límite a que tiende el calor específico medio C_m cuando t_2 tiende a t, es decir

$$C_v = \frac{dQ}{dt}$$

Por consiguiente, puede decirse que el calor específico verdadero de un cuerpo a t grados C, es la cantidad de calor necesaria para calentar 1 grado, a partir de la temperatura t, un gramo (o un kilogramo) de este cuerpo.

Si la temperatura está expresada en grados centígrados, el calor específico se expresa en calorías-gramo o en calorías-kilogramo.

Para los materiales conductores simples el calor específico es constante entre límites de temperatura, a veces muy distantes entre sí; generalmente, el calor específico aumenta con la temperatura. En todos estos materiales, el calor específico es menor que el del agua; el calor específico del agua, entre las temperaturas de 0° C a 60° C, vale 1 caloría-gramo.

La determinación del calor específico de las aleaciones metálicas conductoras, es muy complicada y depende, principalmente, de la composición de estas aleaciones. Si esta composición es conocida y, sobre todo, si se sabe la proporción entre las masas de los diversos componentes de la aleación y la masa total de ésta, es posible determinar con suficiente precisión el calor específico de la aleación. En efecto, si una aleación está constituida por un metal M_1, de calor específico C_1, y por un metal M_2, de calor específico C_2, el calor específico de la aleación vale:

$$C = \tau\, C_1 + (1 - \tau)\, C_2$$

τ = proporción del metal M_1, en tanto por uno.

Por ejemplo, sea una aleación plomo-estaño, con una proporción de plomo $\tau = 0{,}645$.

Calor específico del plomo $C_1 = 0{,}0314$

Calor específico del estaño $C_2 = 0{,}0562$

El calor específico de la aleación vale

$$C = 0{,}645 \times 0{,}0314 + (1 - 0{,}645) \times 0{,}0562 = 0{,}0402$$

Calor y temperatura de fusión. Se denomina *calor de fusión* de un cuerpo, a una temperatura t, a la cantidad de calor que ha de comunicar a la unidad de masa de este cuerpo, supuesto en estado sólido y a dicha temperatura t, para que pase al estado líquido a esta misma temperatura.

La temperatura t se denomina *temperatura de fusión* y, también, *punto de fusión*, y se expresa en °C.

Conductividad térmica. Se denomina así a la facilidad que un material presenta al paso del calor; la conductividad térmica se produce cuando todos los puntos de un material no están a la misma temperatura; entonces, el calor se propaga de molécula a molécula, desde los puntos más calientes a los más fríos.

Si se considera una placa de caras paralelas, de espesor finito y de dimensiones transversales infinitas, donde cada cara se mantenga a temperatura constante, se produce un paso de calor a través de la masa de la placa. Cuando se ha establecido el régimen permanente, la cantidad de calor que atraviesa, durante un tiempo muy corto, una pequeña sección paralela a las caras, depende de la temperatura de éstas últimas y del *coeficiente de conductividad térmica* del material que constituye la placa.

El coeficiente de conductividad térmica es el número de calorías-gramo que atraviesan perpendicularmente, en un segundo, una superficie de un centímetro cuadrado de una lámina que tenga un centímetro de espesor y cuyas caras se mantengan a temperaturas que difieran entre sí, un grado C.

La conductividad térmica de un material es un índice de la mayor o menor dificultad con que este material permitirá la transmisión del calor, generado por efecto Joule, a los cuerpos próximos y al ambiente que le rodea. Cuanto mayor sea el coeficiente de conductividad térmica, tanto más fácilmente se evacuará el calor producido. Al clasificar los materiales conductores por su conductividad térmica, se puede observar que esta clasificación coincide sensiblemente con la que corresponde a la conductividad eléctrica: es decir, que cuanto mejor conductor de la corriente eléctrica es un material, tanto mejor conductor del calor es. La relación entre la conductividad calorífica y la conductividad eléctrica es independiente de la naturaleza del metal y aumenta proporcionalmente a la temperatura absoluta.

Normalmente, la conductividad térmica de un material se expresa en calorías-gramo por grado centígrado, por cm, y por cm², es decir, calorías-gramo/°C/cm²/cm.

Coeficiente de dilatación lineal. Cuando se calienta un material sólido, aumentan sus dimensiones en todos los sentidos, aumentando, por lo tanto su superficie y su volumen: se dice que el material se *dilata*.

La *dilatación lineal* es el aumento de longitud en una determinada dirección. Y el *coeficiente de dilatación lineal* es el aumento que experimenta la unidad de longitud de un determinado material, al aumentar un grado centígrado su temperatura. Entre los límites normales de empleo industrial (generalmente de 0° C a 100° C) puede admitirse que este coeficiente es constante y distinto para cada material. Por consiguiente si se llama:

l_{t1} = longitud a la temperatura t_1
l_{t2} = longitud a la temperatura t_2
β = coeficiente de dilatación lineal

tendremos que si se conoce previamente la longitud l_{t1}, a cierta temperatura t_1, la longitud a la temperatura t_2 será:

$$l_{t2} = l_{t1} \left[1 + \beta \ (t_2 - t_1) \right]$$

En el caso en que $t_1 = 0°$ C, se tiene

$$l_{t2} = l_{t0} \ (1 + \beta_0 \ t_2)$$

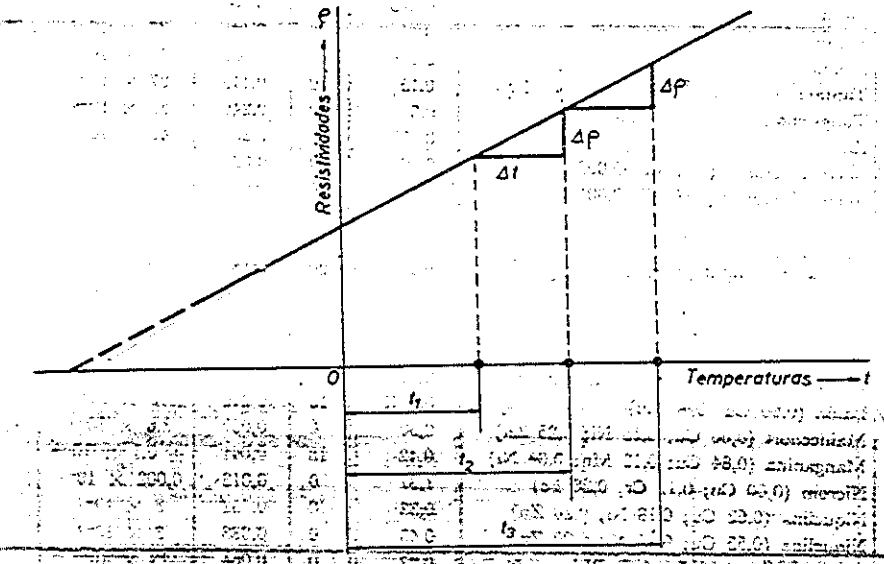


Fig. 1. — Variación lineal de la resistividad con la temperatura.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE ALGUNOS MATERIALES CONDUCTORES

Material	Resistividad ohmios · mm²/m a la temperatura de	°C	Conductividad relativa respecto al cobre a 20 °C	Coeficiente aparente de temperatura α
Aluminio extrapuro (99,9 %)	0,028	20	0,615	41×10^{-4}
Aluminio templado	0,02703	20	0,600	40×10^{-4}
Aldrey (0,987 Al; 0,05 Mg; 0,05 Si; 0,03 Fe)	0,0325	0	0,550	36×10^{-4}
Plata	0,015	0	1,060	40×10^{-4}
Bismuto	0,11	0	0,140	45×10^{-4}
Cobre electrolítico	0,0154	0	1,060	41×10^{-4}
Cobre recocido normalizado	0,01724	20	1,000	$39,3 \times 10^{-4}$
Cobre recocido industrial	0,018	20	0,940	—
Duraluminio	0,45	15	0,360	40×10^{-4}
Estaño	0,11	0	0,140	43×10^{-4}
Hierro dulce	0,11	0	0,140	55×10^{-4}
Fundición de hierro	0,80	—	0,021	75×10^{-4}
Mercurio	0,94076	0	0,018	$8,87 \times 10^{-4}$
Molibdeno	0,49	0	0,035	
Níquel	0,10	0	0,160	60×10^{-4}
Osmio	0,095	20	0,160	42×10^{-4}
Platino	0,11	0	0,140	38×10^{-4}
Plomo	0,195	0	0,082	42×10^{-4}
Tántalo	0,15	20	0,115	27×10^{-4}
Tungsteno	0,07	20	0,246	39×10^{-4}
Zinc	0,057	0	0,302	40×10^{-4}
Acero al cromo (0,13 Cr; 0,002 C)	0,60	20	0,028	
Acero al níquel (0,30 Ni; 0,001 C)	0,82	20	0,021	
Acero al silicio (0,04 Si)	0,62	20	0,028	8×10^{-4}
Acero al manganeso (0,13 Mn; 0,01 C)	0,66	20	0,026	$12,7 \times 10^{-4}$
Bronce al aluminio (0,90 C , 0,10 Al)	0,126	20	0,137	$3,2 \times 10^{-4}$
Bronce fosforoso (0,98 Cu; 0,02 Sn)	0,055	0	0,313	
Bronce silicioso (0,99 Cu; 0,01 Sn)	0,018	0	0,940	
Constantán (0,60 Cu; 0,40 Ni)	0,49	18	0,035	$\pm 0,1 \times 10^{-4}$
Ferroníquel (0,74 Fe; 0,25 Ni; 0,008 Cr)	0,80	20	0,021	9×10^{-4}
Latón (0,60 Cu; 0,40 Zn)	0,0815	15	0,212	10×10^{-4}
Maillechort (0,60 Cu; 0,15 Ni; 0,25 Zn)	0,30	0	0,057	$3,6 \times 10^{-4}$
Manganina (0,84 Cu; 0,12 Mn; 0,04 Ni)	0,42	18	0,041	$\pm 0,1 \times 10^{-4}$
Nicrom (0,60 Cu; 0,12 Cr; 0,28 Fe)	1,37	0	0,013	$0,002 \times 10^{-4}$
Niquelina (0,62 Cu; 0,18 Ni; 0,20 Zn)	0,33	0	0,052	3×10^{-4}
Niquelina (0,55 Cu; 0,25 Ni; 0,20 Zn)	0,45	0	0,038	3×10^{-4}
Platino-rodio (0,90 Pt; 0,10 Rh)	0,27	0	0,064	13×10^{-4}
Reotán (0,53 Cu; 0,25 Ni; 0,17 Zn; 0,05 Fe)	0,52	0	0,033	4×10^{-4}

Resumen de las características generales de los materiales conductores

Como resumen del presente capítulo, a continuación se expresan en otras tantas tablas las propiedades eléctricas, mecánicas y físico-químicas de algunos materiales conductores utilizados en Electrotecnia.

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE ALGUNOS MATERIALES CONDUCTORES

Material	Módulo de elasticidad kg/mm²	Límite de elasticidad kg/mm²	Carga de rotura kg/mm²	Alargamiento a la rotura %
Aluminio puro recocido	7 000	15	17	—
Aluminio templado	7 000	—	25	0,03
Aldrey (0,987 Al; 0,05 Mg; 0,05 Si; 0,03 Fe)	7 000	24	35	0,04
Plata	7 500	0,5	16	—
Cobre recocido	12 000	6	24	0,50
Cobre duro	13 000	20	45	0,01 a 0,001
Duraluminio	7 000	—	45 a 55	0,03 a 0,04
Estaño	5 000	—	8	—
Hierro	20 000	20	66	0,06 a 0,25
Níquel	22 000	9	50	—
Platino	17 000	—	36	—
Plomo	1 700	—	3	—
Tántalo	18 600	—	9,3	—
Zinc	9 000	—	6	—
Acero ordinario	22 000	20 a 60	35 a 100	0,10 a 0,35
Acero al níquel (0,30 Ni; 0,001 C)	20 000	50	70 a 80	0,30 a 0,40
Bronce fosforoso (0,98 Cu; 0,02 Sn)	12 000	—	50 a 70	1 a 2,5
Latón (0,60 Cu; 0,40 Zn)	9 200	—	42	0,38
Constantán (0,60 Cu; 0,40 Ni)	16 300	30	32	0,06
Maillechort (0,60 Cu; 0,15 Ni; 0,25 Zn)	10 800	—	—	—
Manganina (0,84 Cu; 0,12 Mn; 0,04 Ni)	12 400	—	—	—
Ferroníquel (0,74 Fe; 0,25 Ni; 0,008 Cr)	—	40	75	0,50

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ALGUNOS MATERIALES CONDUCTORES

Material	Peso específico gr/cm³	Punto de fusión °C	Calor específico	Conductividad calorífica Cal-gr/°C/cm²/cm	Coeficiente de dilatación lineal
Aluminio extrapuro (99,9 %)	2,58	—	—	—	—
Aluminio templado	2,703	657	0,22	0,48	23 × 10⁻⁶
Aldrey (0,987 Al; 0,05 Mg; 0,5 Si; 0,03 Fe)	2,7	—	—	—	22 × 10⁻⁶
Plata	10,5	960	0,056	0,96	18,7 × 10⁻⁶
Bismuto	10,05	269,2	0,03	0,02	15,4 × 10⁻⁶
Cobre electrolítico	9,05	1 080,0	0,093	0,92	—
Cobre recocido normalizado	8,89	—	—	—	—
Cobre recocido industrial	8,9	1 082,0	0,092	0,84	16 × 10⁻⁶
Duraluminio	2,8	—	—	—	23 × 10⁻⁶
Estaño	7,3	231,5	0,055	0,15	27 × 10⁻⁶
Hierro dulce	7,85	1 500,0	0,113	0,20	11,5 × 10⁻⁶
Mercurio	13,55	— 39	0,033	0,02	—
Molibdeno	10,2	2 550	0,07	—	3,6 × 10⁻⁶
Níquel	8,7	1 452	0,11	0,14	12,5 × 10⁻⁶
Oro	22,5	2 700	—	—	5,7 × 10⁻⁶
Platino	21,5	1 750	0,032	0,19	8,8 × 10⁻⁶
Plomo	11,3	327	0,030	0,08	29 × 10⁻⁶
Tántalo	16,6	2 800	—	—	—
Tungsteno	18,7	2 970	0,031	—	3,36 × 10⁻⁶
Zinc	7,12	418	0,068	—	26 × 10⁻⁶
Acero al manganeso (0,13 Mn; 0,01 C)	7,81	1 260	—	0,03	15 × 10⁻⁶
Bronce al aluminio (0,90 Cu; 0,40 Al)	7,6	1 050	0,104	0,18	16,5 × 10⁻⁶
Bronce fosforoso (0,98 Cu; 0,02 Sn)	8,9	—	—	—	17 × 10⁻⁶
Constantán (0,60 Cu; 0,40 Ni)	8,4	1 240	0,100	0,054	12 × 10⁻⁶
Ferronquel (0,74 Fe; 0,25 Ni; 0,008 C)	8,1	1 500	—	0,15	18 × 10⁻⁶
Maillechort (0,60 Cu; 0,15 Ni; 0,25 Zn)	8,6	1 500	0,095	—	18,4 × 10⁻⁶
Manganina (0,84 Cu; 0,12 Mn; 0,04 Ni)	8,3	—	0,097	0,052	—

2 Características especiales de los materiales conductores

Generalidades

En el capítulo anterior se han estudiado las características que son generales a todos los materiales conductores. En el presente capítulo se resumen algunas de las características más importantes que afectan solamente a un grupo de materiales conductores o, en otros casos, que deben tenerse en cuenta solamente en condiciones muy especiales de funcionamiento.

Resistencia de los materiales conductores para corrientes de alta frecuencia

El paso de una corriente alterna por un conductor, está siempre acompañado por fenómenos de inducción electromagnética, que se producen en el interior del conductor y cuyo efecto es modificar la distribución de la corriente eléctrica en la sección del mismo: la densidad de corriente es mayor en la periferia del conductor y va disminuyendo hacia el centro donde puede llegar a ser prácticamente nula. Este fenómeno se conoce con el nombre de *efecto Kelvin* o, también, *efecto pelicular*. Por causa del pelicular, la resistencia eléctrica de un conductor es mayor en corriente alterna que en corriente continua y, además, resulta proporcional a la frecuencia de la corriente.

El estudio de la distribución de la corriente en un conductor cilíndrico, lleva a definir la relación k, existentes entre la resistencia R de este conductor a la corriente continua y la resistencia R a la corriente alterna de una frecuencia determinada. Esta relación vale, en general,

$$k = \frac{R}{R}$$

Para hallar la resistencia R' a una frecuencia determinada, se comienza por calcular el valor siguiente:

$$x = \pi\, d \sqrt{\frac{2\, f\, \mu}{\rho \times 10^9}}$$

d = diámetro del conductor, en cm
f = frecuencia de la corriente alterna, en Hz
μ = permeabilidad magnética del conductor (para materiales no magnéticos $\mu = 1$; para materiales magnéticos debe determinarse por ensayo en cada caso)
ρ = resistividad en corriente continua en $\Omega\ cm^2/cm$.

En la tabla siguiente, se expresan los valores de

se obtiene

$$k = \frac{R'}{R}$$

en función de x, hallada anteriormente

TABLA 4. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA PARA ALTAS FRECUENCIAS

Valores de x	Valores de $k = \frac{R'}{R}$	Valores de x	Valores de $k = \frac{R'}{R}$
0	1,0000	4,5	1,8628
0,5	1,0000	5	2,0430
1	1,0001	5,5	2,2190
1,5	1,0258	6	2,3937
2	1,0805	8	3,0956
2,5	1,1747	10	3,7940
3	1,3180	15	5,5732
3,5	1,4920	20	7,3250
4	1,6778		

Naturalmente, para hallar la resistencia R' en corriente alterna, bastará con aplicar la fórmula

$$R' = k\, R$$

siendo R la resistencia en corriente continua.

Resistencias de contacto entre materiales conductores

Cuando se aplica una pieza de material conductor sobre otra, con objeto de establecer un contacto eléctrico, en realidad, y cualquiera que sea la presión a que estén sometidas, ambas piezas quedan separadas por una distancia relativamente grande, en relación con las dimensiones atómicas: ~~con el ajuste más perfecto se consiguen separaciones de 1 μ entre ambas piezas, mientras que el átomo es unas 1 000 veces más pequeño.~~ En estas condiciones puede comprenderse fácilmente que las *resistencias de contacto* entre las dos piezas, pueden tener un valor considerable.

Por consiguiente, y de acuerdo con lo expresado en el párrafo anterior, resulta que el paso de energía eléctrica de una pieza a otra, se efectúa de dos formas:

a) a través de una zona de contacto íntimo, o *zona de conducción*.
b) a través de una *zona de disrupción*, donde el gradiente de tensión puede alcanzar valores elevados, próximos a la rigidez dieléctrica del aire o del aislante que separe ambas zonas en contacto.

Como en los contactos, tal como se ha visto, se presentan, simultáneamente, fenómenos conductores y fenómenos disruptivos, no es posible aplicar en este caso la ley de Ohm.

Definiremos la *resistencia de contacto* como la relación existente entre la tensión en los bornes de un contacto y la intensidad de corriente que atraviesa este contacto.

La resistencia de contacto no es constante y depende, entre otras causas:

a) de la presión a que están sometidas las piezas, o presión de contacto
b) de la composición de las piezas en contacto
c) de la forma y sección de las piezas en contacto
d) de la naturaleza del medio ambiente
e) del sentido e intensidad de la corriente
f) de la clase de corriente (continua, alterna, etc.)

La plata, el cobre, el latón y el bronce dan buenos contactos; el aluminio da contactos de resistencia muy elevada.

Se puede considerar un contacto como bueno, cuando la diferencia de temperatura entre el contacto y los puntos de alrededor, es muy pequeña. La caída de tensión u en el contacto, expresada en milivoltios y para intensidades superiores a los 100 A, no deben pasar del valor expresado por la siguiente fórmula:

$$u = 2 + \left(\frac{11}{2\,500} I\right)$$

I = intensidad de corriente, en amperios

Al ponerse en contacto dos metales diferentes, se produce una fuerza electromotriz, distinta de la termoeléctrica; uno de los metales se hace electropositivo en la superficie del contacto, y el otro se hace electronegativo. Este fenómeno se conoce con el nombre de *efecto Volta*.

El calentamiento de uno de los electrodos altera el estado eléctrico del sistema: el electrodo calentado se hace electronegativo. También influyen en este fenómeno, las impurezas del metal, el contenido de vapor de agua, etc.

Superconductividad

En el capítulo anterior se ha estudiado que la resistencia eléctrica de los materiales conductores es una función creciente de la temperatura: se deduce fácilmente que habrá una temperatura para la cual, la resistencia eléctrica se anulará. Esta temperatura está cercana al cero absoluto (−237° C), de donde se deduce que la resistencia eléctrica es sensiblemente proporcional a la temperatura absoluta del material conductor.

En general, la resistencia eléctrica aumenta linealmente con la temperatura, o sea que tal dependencia estará representada por rectas, de acuerdo con lo expresado en la figura 2 para varios materiales conductores. No obstante, la prolongación de estas rectas hacia la izquierda, es decir, hacia las zonas de temperaturas muy bajas, no se cumple siempre. En efecto, en muchos casos se ha comprobado que, al principio, las líneas de resistencia tienden a curvarse algo hacia arriba para después, a temperaturas determinadas muy bajas, denominadas *temperaturas críticas*, la resistencia desciende a valores muy pequeños, no medibles.

En la figura 3 se representa gráficamente este proceso, en las

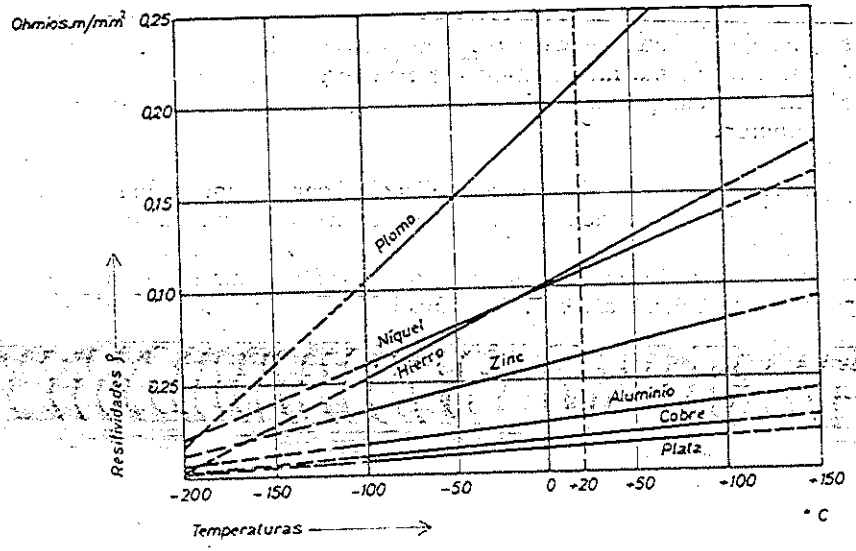


Fig. 2.—Variación de las resistividades de varios materiales conductores, en función de la temperatura.

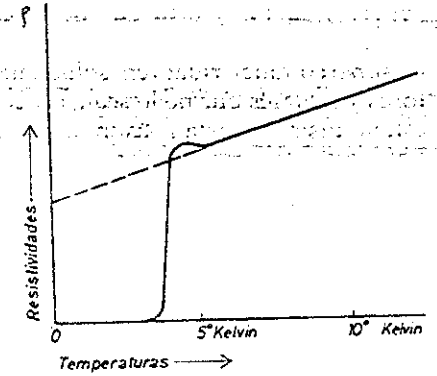


Fig. 3.—Representación gráfica del fenómeno de superconductividad, en las proximidades del cero absoluto.

proximidades del cero absoluto. En estas condiciones, se habla de *superconductividad*. A continuación, se citan algunas características del estado superconductor:

a) en la zona de superconductividad desaparece prácticamente la resistencia eléctrica, y una vez se ha iniciado una corriente eléctrica, puede persistir largo tiempo sin que actúe tensión alguna.

b) el efecto Joule se hace inapreciable, ya que la energía eléctrica se transforma muy lentamente en energía calorífica.
c) no hay campo magnético en el interior de los cuerpos superconductores.

Todavía no se ha dado una explicación convincente sobre el fenómeno de la superconductividad. Pero el hecho es que se ha podido observar aunque, por el momento, solamente en un número reducido de metales y de aleaciones que, por lo general, son cuerpos poco comunes y relativamente caros. A continuación, se exponen algunos de estos cuerpos, junto con sus temperaturas críticas, expresadas éstas en grados Kelvin:

Plomo	7,2° K
Mercurio	4,2° K
Indio	3,4° K
Estaño	3,2° K
Talio	2,47° K
Galio	1,07° K

También se ha observado el fenómeno de la superconductividad en diversas aleaciones metálicas, constituidas generalmente por un metal superconductor y otro que no lo es; como ejemplos, se pueden citar las aleaciones estaño-antimonio y bismuto-teluro. También se presenta la superconductividad en soluciones sólidas de metales superconductores y metales que no lo sean, especialmente en los sistemas siguientes: estaño-bismuto, estaño-cadmio, estaño-zinc, talio-cadmio y talio-oro.

3 Materiales conductores

Generalidades

Los *materiales conductores* que existen en la Naturaleza o que pueden ser fabricados por el hombre, son tantos y tan variados que resulta prácticamente imposible un estudio detallado de todos ellos y de sus aplicaciones presentes y futuras dentro de la extensión impuesta a la presente obra. Téngase en cuenta que se consideran materiales conductores todos los metales y aleaciones metálicas, más otros materiales como el grafito y algunos de sus compuestos.

Por estas razones, hemos de limitarnos a describir y estudiar solamente los más interesantes materiales conductores que tienen aplicación actual en Electrotecnia.

Cobre

El *cobre* es un metal rojo, más o menos oscuro. Es, después de la plata, el mejor conductor de la electricidad y el calor.

Es muy dúctil y maleable; cuando se deforma en frío duplica su resistencia mecánica y su dureza, pero se reduce su alargamiento a la rotura. Este aumento de resistencia que produce la deformación en frío se aprovecha para muchas de las aplicaciones del cobre, pero existe el inconveniente de que obliga a recocerlo frecuentemente cuando se lamina o estira.

El agua pura no ataca al cobre a ninguna temperatura. Los agentes atmosféricos forman en su superficie una película verdosa constituida por sulfato de cobre, lo que reduce el proceso de la oxidación a 1 μ por año, aproximadamente. Al calentar el cobre, se forma, a los 120° C, una película rojiza de óxido cúprico (Cu^2O) que más tarde se convierte en negruzca al formarse óxido cuproso (Cu O); a partir de los 500° C, el cobre se oxida rápidamente en toda su masa.

Las características generales del cobre puro se expresan en la tabla que sigue a continuación.

TABLA 5. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COBRE PURO

Símbolo químico	Cu
Número atómico	29
Peso atómico	63,54
Peso específico, en gr/cm³	8,96
Conductividad eléctrica a 20 °C, en siemens · m/mm²	59
Resistividad eléctrica a 20 °C, en ohmios · mm²/m	0,01673
Conductividad calorífica a 0 °C, en calorías-gramo/°C/cm²/cm	0,941
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	$16,5 \times 10^{-6}$ por °C
Punto de fusión, en °C	1 083 ± 1
Calor latente de fusión, en calorías/gr	50,6
Calor específico medio, en calorías/gr × °C	0,092
Punto de ebullición, en °C	2 595
Equivalente electroquímico, en gr/Amp por hora	1,186
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	12 700
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	15 — 20
Alargamiento a la rotura, en %	0,3

En Electrotecnia, se utilizan varias clases de cobre en las que se admiten otros productos metalúrgicos, aunque solamente con el carácter de impurezas. A continuación se citan las clases de cobre electrotécnico:

Cobre electrolítico. Se obtiene electrolíticamente, por refinado: un electrodo de cobre puro hace de cátodo y un electrodo de cobre con impurezas hace de ánodo; el cobre electrolítico se deposita sobre el cátodo. Las características del cobre electrolítico coinciden, casi exactamente con las expresadas en la tabla anterior, ya que el contenido mínimo de cobre ha de ser de 99,9 %.

Cobre recocido. El *cobre recocido* llamado también *cobre blando* tiene una resistencia a la rotura de 22 a 28 kg/mm². El cobre recocido, a 20° C de temperatura ha sido adoptado como cobre-tipo para las transacciones comerciales en todo el mundo. El cobre recocido es dúctil y maleable, se maquina fácilmente y se utiliza, sobre todo, para la fabricación de conductores eléctricos que no hayan de estar sometidos a grandes esfuerzos mecánicos (por ejemplo, en instalaciones interiores). A continuación, se resumen en una tabla, las características generales del cobre recocido.

TABLA 6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COBRE RECOCIDO

Peso específico en gr/cm³	8,95
Conductividad a 20 °C, en siemens · m/mm²	58,14
Resistividad a 20 °C, en ohmios · mm²/m	0,0172
Coeficiente de temperatura	0,0039
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	9 000
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	22 — 28
Límite de elasticidad, en kg/mm²	14 — 45
Alargamiento a la rotura, en %	0,5
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	$16 \times 10^{-6} \times$ °C
Calor específico a 20 °C, en calorías/gr × °C	0,0912
Calor específico a 100 °C, en calorías/gr × °C	0,0942

Cobre semiduro. Tiene una resistencia a la rotura de 28 a 34 kg/mm² y no es tan dúctil ni maleable como el anterior. Se utiliza en líneas aéreas, con vanos que no excedan de 40 a 50 m.

Cobre duro. El *cobre duro* se obtiene aprovechando la circunstancia, apuntada anteriormente de que este metal, trabajado en frío, adquiere dureza y resistencia mecánica, aunque a expensas de su ductilidad y maleabilidad. El cobre duro tiene una carga de rotura de 35 a 45 kg/mm² y por sus buenas propiedades mecánicas se emplea para conductores de líneas eléctricas exteriores, donde han de estar sometidos a esfuerzos mecánicos elevados; este tipo de cobre no es muy empleado en instalaciones interiores, debido a que se maquina más difícilmente, que el cobre recocido, anteriormente citado. A continuación, se exponen en una tabla las características generales más interesantes del cobre duro.

TABLA 7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COBRE DURO

Peso específico, en gr/cm³	8,95
Conductividad a 20 °C, en siemens · m/mm²	56,82
Resistividad a 20 °C, en ohmios · mm²/m	0,0176
Coeficiente de temperatura	0,0039
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	12 000
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	35 ... 46
Límite de elasticidad, en kg/mm²	30 ... 41
Alargamiento a la rotura, en %	0,5 ... 6
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	16 × 10⁻⁶ × °C
Calor específico a 20 °C, en calorías/gr × °C	0,0912
Calor específico a 100 °C, en calorías/gr × °C	0,0942

Cobre duro telefónico. Tiene gran resistencia mecánica (de 50 a 70 kg/mm²) y aunque se ha empleado algunas veces para conductores de líneas eléctricas aéreas, su principal campo de aplicación lo constituye las líneas de telecomunicación. En la siguiente tabla se expresan sus características generales.

TABLA 8. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COBRE DURO TELEFÓNICO

Peso específico, en gr/cm³	8,89
Conductividad a 20 °C, en siemens · m/mm²	40,65
Resistividad a 20 °C, en ohmios · mm²/m	0246
Coeficiente de temperatura	0,002
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	12 000
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	50 ... 70
Límite de elasticidad, en kg/mm²	45 ... 65,5
Alargamiento a la rotura, en %	1 ... 2,5
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	16 × 10⁻⁶ × °C
Calor específico a 20 °C, en calorías/gr × °C	0,0907
Calor específico a 100 °C, en calorías/gr × °C	0,0937

En realidad, lo que se denomina cobre duro y cobre duro telefónico, son aleaciones de cobre. El cobre duro contiene estaño y una pequeña proporción de silicio, por lo que sería más correcto denominarlo *bronce silicioso.* De la misma forma, el cobre duro telefónico contiene estaño y cierta cantidad de fósforo, por lo que su denominación correcta habría de ser *bronce fosforoso* (véanse los siguientes parágrafos).

Aleaciones de cobre

Los metales que son solubles en cantidades moderadas en una solución sólida de cobre, tales como el manganeso, el níquel, el zinc, el estaño, el aluminio, etc., generalmente endurecen el cobre y disminuyen su ductibilidad, pero mejoran sus condiciones de laminado y de trabajo mecánico. Por otra parte, los metales que son sólo ligeramente solubles en una solución sólida de cobre, como el bismuto y el plomo, no endurecen, pero disminuyen su ductibilidad y su tenacidad y reducen sus cualidades de dejarse trabajar en caliente.

De una forma general se puede decir que las aleaciones de cobre mejoran algunas de las propiedades mecánicas o térmicas del cobre puro, pero con menoscabo de las propiedades eléctricas. Las aleaciones de cobre más empleadas en Electrotecnia son las siguientes:

a) Latones
b) Bronces

las cuales pasamos a estudiar a continuación.

Latones

Los *latones* son aleaciones de cobre y zinc con un 50 % de este último metal como máximo, ya que a partir de dicho porcentaje, las aleaciones resultan frágiles.

Se denominan *latones binarios* cuando en su composición entran solamente el cobre y el zinc, *latones ternarios*, si se añade además un tercer elemento (aluminio, hierro, manganeso, estaño, etc.) y *latones complejos* si en su composición entran varios elementos, con base siempre de cobre y zinc.

En España, los nombres de los latones han sido normalizados por Normas UNE. Los latones binarios se denominan *Cuzin* (Cu y Zn) y los latones ternarios toman diferentes nombres según el tercer metal que entre en su composición: por ejemplo, el *Cuzinestán* (Cu, Zn, Sn) tiene cobre, zinc y estaño, en su composición, el *Cuzinplo* (Cu, Zn, Pb) tiene cobre, zinc y plomo, etc. A los latones fundidos se les antepone la sílaba Fu; por lo tanto, habrá un *Fucuzin*, un *Fucuzinplo*, etc.

Las propiedades mecánicas de los latones son muy variables y dependen, en gran manera, del contenido de zinc; en general, para los latones forjados o recocidos, la carga de rotura aumenta con el contenido de zinc hasta un 45 %, en que alcanza el máximo, para disminuir después bruscamente entre el 45 y el 50 %. El alargamiento a la rotura sigue una marcha análoga, pero con un máximo hacia el 30 % de zinc, para disminuir después más lentamente. La dureza aumenta con la proporción de zinc. En general, los latones no están indicados para ser expuestos a la intemperie, debido a las rajaduras de corrosión por la tensión mecánica, tanto más pronunciadas cuanto mayor sea el contenido de zinc.

La conductividad eléctrica de los latones es relativamente baja, por lo que su empleo en Electrotecnia no está muy extendido. En la siguiente tabla, se expresan las características de algunos latones utilizados para aplicaciones electrotécnicas.

TABLA 9. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS LATONES EMPLEADOS COMO MATERIALES CONDUCTORES

Composición	Peso específico gr/cm³	Conductividad $s\ \frac{m}{mm^2}$	Resistividad $\Omega\ \frac{mm^2}{m}$	Resistencia a la tracción kg/mm²
91 % Cu; 9 % Zn	8,6	27,47	0,0364	42
75 % Cu; 25 % Zn	8,4	22,22	0,045	54
66 % Cu; 34 % Zn	8,3	18,18	0,055	50
60 % Cu; 40 % Zn	8,3	11,76	0,085	41

Bronces

Desde muy antiguo, se denominan *bronces* a las aleaciones de cobre y estaño. Actualmente se aplica también esta denominación de bronces a todas las aleaciones binarias del cobre con todos los demás metales, excepto con el zinc que, como hemos visto anteriormente, se denominan latones.

El color es variable desde el rojo (cuando la proporción de estaño no pasa de 5 %) hasta el amarillo dorado y amarillo claro; cuando la proporción de estaño llega a 45 %, el color se vuelve blanco.

Los bronces modernos son, frecuentemente, aleaciones ternarias, que, además de cobre y estaño, contienen un tercer elemento, como el fósforo, el silicio, el manganeso, el zinc, el aluminio y el cadmio; en estos casos, se nombra el tercer elemento en el nombre de la aleación como, por ejemplo *bronce fosforoso, bronce silicioso*, etc. Algunos bronces de importancia electrotécnica son aleaciones cuaternarias, es decir, que contienen dos elementos, además del cobre y del estaño.

En los bronces empleados como materiales conductores, el contenido de estaño y de otros metales es generalmente inferior al de los bronces utilizados en aplicaciones mecánicas, donde las buenas propiedades físicas y de resistencia a la corrosión, se consideran fundamentales.

Las propiedades mecánicas varían mucho según la composición. La

dureza y, en menor grado, la tenacidad y la ductilidad, dependen de las transformaciones de la aleación en estado sólido. En las aleaciones ricas en cobre, la carga de rotura y el alargamiento aumentan muy poco con el temple, pero cuando la proporción de estaño es inferior a 8 %; el aumento de estas características es importante en cuanto la temperatura del temple pasa de los 500° C. La carga de rotura depende muy poco de la composición del bronce, pero el alargamiento máximo varía según el contenido de estaño.

La maleabilidad del bronce es siempre menor que la del cobre y depende, esencialmente, de las condiciones en que se trabaja la aleación. Cuando el estaño entra en una proporción de 13 % resulta imposible el trabajo en frío; por el contrario, el temple permite este trabajo en frío pues, al contrario de lo que sucede con los aceros, esta operación hace al bronce más dulce y maleable.

A continuación, se estudian algunos de los bronces más utilizados en Electrotecnia.

Bronce silicioso. Como hemos visto anteriormente, se le llama también *cobre duro;* está constituido por 85 % de cobre, 8 % de estaño, 2 % de zinc, 4 % de silicio y 0,8 % de fósforo. Sus características y propiedades han sido ya expuestas en el parágrafo dedicado al cobre.

Bronce fosforoso. También se denomina *cobre duro telefónico,* tal como se ha visto en un parágrafo anterior. El bronce fosforoso está normalizado con el nombre de *custán* (Cu, Sn) y está constituido de la siguiente forma:

Cobre: 89 a 98,5 %
Estaño: 1,5 a 11 %
Fósforo: 0,03 a 0,3 %

Sus características y campos de aplicación se han expuesto en el parágrafo dedicado al cobre. Sólo cabe añadir que si se agrega una pequeña cantidad de hierro o de manganeso, se obtiene una aleación de gran resistencia mecánica, muy apropiada para la fabricación de piezas de contacto que hayan de soportar grandes esfuerzos.

Bronces al manganeso. Constituyen un conjunto de materiales muy interesantes por sus aplicaciones electrotécnicas. Están constituidos por cobre y manganeso a los que se añaden algunas veces otros elementos como el aluminio, el níquel y el silicio. Las aleaciones constituidas exclusivamente por cobre y manganeso se denominan también *cupromanganesos.* La propiedad más notable de estas aleaciones es su resistencia mecánica a temperaturas hasta de 450° C, por lo que, en

debidas proporciones, se emplean en la fabricación de resistencias eléctricas; por ejemplo, la aleación denominada *resistín,* constituida por 70 a 75 % de cobre y 25 a 30 % de manganeso.

Los bronces complejos al manganeso más utilizados en Electrotecnia, son los siguientes:

Los *bronces al manganeso-níquel,* constituidos por 86 % de cobre, 12 % de manganeso y 2 % de níquel, conocidos comercialmente con el nombre de *manganina,* material muy utilizado en la fabricación de resistencia eléctricas de precisión y de instrumentos eléctricos patrones, por tener muy reducido coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura; es decir, que la resistividad permanece prácticamente constante a todas las temperaturas de servicio.

Los *bronces al manganeso-aluminio* se fabrican con proporciones de manganeso comprendidas entre 3 y 20 %, y de aluminio, entre 3 y 10 %. La característica general es su gran resistencia mecánica a elevadas temperaturas. La más conocida de estas aleaciones es la llamada *isabellin,* constituida por 84 % de cobre, 13 % de manganeso y 3 % de aluminio, y que se emplea en la fabricación de resistencias eléctricas. También se han conseguido aleaciones de este tipo con un coeficiente de temperatura aún más reducido que el de la manganina, citada anteriormente, y constituidas por 85 % de cobre, 9,5 % de manganeso y 5,5 % de aluminio; esta aleación, convenientemente tratada, tiene una resistencia prácticamente constante.

Bronces al níquel. Constituyen también un importante grupo de aleaciones de amplias aplicaciones en Electrotecnia. Estas aleaciones pueden ser binarias y constituidas entonces por cobre y níquel exclusivamente o complejas, y entonces entran en su composición otros elementos, como zinc, hierro, etc.

Cuando estas aleaciones están constituidas solamente por cobre y níquel, reciben el nombre general de *cuproníqueles.* En las Normas UNE españolas están normalizadas los nombres de *Cuni* (Cu Ni) para las aleaciones de cobre y níquel y de *Cuzini* (Cu Zn Ni) para las aleaciones de cobre, zinc y níquel.

Entre los cuproníqueles o Cuni, de interés electrotécnico, se pueden citar el *Advance* (55 % de cobre y 45 % de níquel) y el *Constantán* (60 % de cobre y 40 % de níquel), utilizados, sobre todo en la fabricación de resistencias de precisión, debido a que su coeficiente de temperatura permanece prácticamente constante en una amplia gama de temperaturas.

Muchos de los bronces constituidos principalmente por cobre, níquel y zinc se emplean en Electrotecnia, bajo distintos nombres, según la procedencia y composición: *Alpaca, Plata alemana, Maillechort,*

Argentán, etc. De una manera general, la composición de este tipo de aleaciones varía de la forma siguiente:

Cobre	52 a 67 %,	más frecuentemente 57 a 64 %
Níquel	6 a 28 %	" " 13 a 21 %
Zinc	13 a 35 %	" " 13 a 23 %

Estas aleaciones son de color blanco, más o menos amarillento, según el contenido de níquel. Su peso específico varía entre 8,3 y 8,7; funden a temperaturas comprendidas entre 950° C y 1 100° C y tienen elevada resistencia a la tracción (60 a 70 kg/mm²). Se emplean, sobre todo, para la fabricación de resistencias.

Bronces al berilio. Las aleaciones constituidas solamente por cobre y berilio se denominan *cuproberilios*, reservándose el nombre general de *aleaciones al berilio* a las constituidas, además de los elementos citados, por estaño, zinc, aluminio, fósforo, etc.

Los cuproberilios con 1 a 3 % de berilio tienen una resistencia a la tracción equivalente a la del acero y dos veces superior a la del bronce fosforoso. Además tienen mejores propiedades conductoras que los bronces ordinarios. Los bronces complejos al berilio son aleaciones de cobre y otro elemento en las que se ha sustituido parte de este elemento por un pequeño porcentaje de berilio, que eleva considerablemente su resistencia mecánica; como ejemplos de este tipo de aleaciones se pueden citar, el *bronce fosforoso al berilio* (90,4 % de cobre, 9 % de estaño, 0,6 % de berilio) y el *bronce al aluminio y berilio* (96 % de cobre, 3 % de aluminio, 1 % de berilio). Estos bronces complejos al berilio tienen las mismas aplicaciones específicas del elemento principal que los forman (estaño o aluminio), mejoradas por la adición de berilio.

En lo que se refiere a los cuproberilios, citados anteriormente, tienen un amplio campo de aplicaciones, por su elevada resistencia mecánica, elasticidad, dureza, buena conductividad eléctrica y calorífica, gran resistencia a la corrosión, amagnetismo y facilidad de mecanizado; entre estas aplicaciones, se pueden citar las siguientes:

a) resortes para portaescobilla

b) resortes para contactores y relés

Resumen. A continuación, y como resumen del presente parágrafo, en una tabla se indican las características de los bronces más interesantes desde el punto de vista electrotécnico. En algunos casos, no nos ha sido posible encontrar los datos correspondientes, sin embargo creemos que en esta tabla se incluyen los más importantes bronces utilizados actualmente en Electrotecnia.

Aluminio

El *aluminio* es un metal blanco brillante. Tiene pequeña resistencia mecánica y gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos muy finos y laminarlo en láminas de espesores hasta 0,4 micras; a la temperatura de 500° C se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente.

La propiedad química más destacada es su gran afinidad por el oxígeno del aire lo que, aunque parezca un contrasentido, hace que el aluminio sea completamente inalterable en el aire, pues se recubre de una fina capa de óxido de aluminio, que es muy adherente e impermeable, y que actúa a manera de protección del resto de la masa contra la intemperie. Debido a esta película protectora resiste también la acción del vapor de agua, del ácido nítrico concentrado y de los gases y humos industriales; sin embargo, es atacado por el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico diluido y por las soluciones salinas.

TABLA 11. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ALUMINIO

Símbolo químico	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26,98
Peso específico, en gr/cm³	2,7
Conductividad eléctrica a 20 °C, en siemens. m/mm²	35,36
Resistividad eléctrica a 20 °C, en ohmios. mm²/m	0,02828
Coeficiente de temperatura	0,004
Conductividad calorífica a 0 °C, en calorías/°C/cm²/cm	0,53
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	23,6 × 10⁻⁶ por °C
Punto de fusión, en °C	660
Calor latente de fusión, en calorías/gr	94,5
Calor específico medio, en calorías/gr por °C	0,215
Punto de ebullición, en °C	2.450
Equivalente electroquímico, en gr/Amp. por hora	0,3354
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	7.200
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	16 — 20
Alargamiento a la rotura, en %	30

60.13 - 3

La duración del aluminio depende, esencialmente de su pureza. Un aluminio con gran contenido de cobre, se descompone aunque tenga ya formada la capa exterior protectora de óxido de aluminio, ya que en el presente caso, esta capa no puede impedir el progreso de la descomposición hacia el interior del metal. También sucede que si la chatarra empleada en la fabricación de conductores de aluminio no estaba suficientemente refinada, el metal se altera al cabo de cierto tiempo. Por otra parte, un aluminio químicamente puro es muy blando y su carga a la rotura resulta muy pequeña por lo que no puede emplearse como conductor para líneas aéreas, que pueden estar sometidas a elevados esfuerzos mecánicos. La experiencia ha demostrado que el grado de pureza óptimo para el aluminio, es de 99 % a 99,5 %.

En la tabla 11 se exponen las características más interesantes del aluminio.

Es muy interesante la comparación de las propiedades eléctricas y mecánicas del aluminio y del cobre. Dados los valores de los pesos específicos y de las resistividades de ambos metales, la relación

$$\frac{Aluminio}{Cobre} = \frac{2{,}7 \times 2{,}82}{8{,}95 \times 1{,}71} \approx \frac{1}{2}$$

es el origen de una conocida regla que dice: *1 kg de cobre es eléctricamente equivalente a 0,5 kg de aluminio.* Por otra parte, el precio del cobre en el mercado es, aproximadamente, el doble que el del aluminio, lo que quiere decir que este último metal resulta competitivo con el cobre. Si a esto se añade que, por causa del menor peso específico del aluminio, los elementos auxiliares de las instalaciones, tales como apoyos, aisladores, herrajes, etc., resultan más económicos para el aluminio, se comprenderá fácilmente que el aluminio haya sustituido en gran parte al cobre para muchas aplicaciones eléctricas, sobre todo para la fabricación de conductores destinados a las líneas aéreas. En la página siguiente se incluye la tabla 12 comparativa de las propiedades de ambos metales.

A continuación, se citan algunas aplicaciones típicas del aluminio en Electrotecnia:

a) Conductores para líneas eléctricas aéreas (véase, para más detalle, el volumen de esta obra dedicado a "Instalaciones eléctricas generales").

b) Conductores para líneas eléctricas interiores (véase el volumen de esta obra dedicado a "Instalaciones eléctricas interiores").

c) Devanados para máquinas eléctricas y transformadores (véase el volumen de esta obra dedicado a "Bobinados de máquinas eléctricas").

d) Barras de instalaciones de distribución (véase el volumen de esta obra dedicado a "Estaciones de transformación y distribución").

e) Aparatos eléctricos. El aluminio se emplea, por su amagnetismo, en las piezas e instrumentos que provocarían pérdidas y calentamientos si estuvieran fabricadas de materiales magnéticos.

f) Condensadores. Actualmente, el aluminio es el metal más utilizado como electrodo en los condensadores industriales con aislamiento de papel; para esta aplicación, el aluminio se dispone en forma de banda continua de 6 a 8 micras de espesor, que se arrolla sobre el aislamiento. También se emplea en los condensadores electroquímicos utilizados en aplicaciones de alta frecuencia: el ánodo está constituido por aluminio muy puro, al 99,99 %, mientras que el cátodo es aluminio comercial al 99 % de pureza. También los condensadores variables para radiotecnia se fabrican de aluminio.

TABLA 12. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COBRE Y DEL ALUMINIO

		Aluminio	Cobre
A IGUAL CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	Relación de las secciones	1,64	1
	Relación de los diámetros	1,28	1
	Relación de los pesos	0,50	1
	Relación de las cargas de rotura	0,78	1
A IGUAL CALENTAMIENTO	Relación de las secciones	1,405	1
	Relación de los pesos	0,424	1
A IGUAL SECCION	Relación de las conductividades	0,61	1
	Relación de los pesos	0,30	1

La duración del aluminio depende, esencialmente de su pureza. Un aluminio con gran contenido de cobre, se descompone aunque tenga ya formada la capa exterior protectora de óxido de aluminio, ya que en el presente caso, esta capa no puede impedir el progreso de la descomposición hacia el interior del metal. También sucede que si la chatarra empleada en la fabricación de conductores de aluminio no estaba suficientemente refinada, el metal se altera al cabo de cierto tiempo. Por otra parte, un aluminio químicamente puro es muy blando y su carga a la rotura resulta muy pequeña por lo que no puede emplearse como conductor para líneas aéreas, que pueden estar sometidas a elevados esfuerzos mecánicos. La experiencia ha demostrado que el grado de pureza óptimo para el aluminio, es de 99 % a 99,5 %.

En la tabla 11 se exponen las características más interesantes del aluminio.

Es muy interesante la comparación de las propiedades eléctricas y mecánicas del aluminio y del cobre. Dados los valores de los pesos específicos y de las resistividades de ambos metales, la relación

$$\frac{Aluminio}{Cobre} = \frac{2{,}7 \times 2{,}82}{8{,}95 \times 1{,}71} \approx \frac{1}{2}$$

es el origen de una conocida regla que dice: *1 kg de cobre es eléctricamente equivalente a 0,5 kg de aluminio.* Por otra parte, el precio del cobre en el mercado es, aproximadamente, el doble que el del aluminio, lo que quiere decir que este último metal resulta competitivo con el cobre. Si a esto se añade que, por causa del menor peso específico del aluminio, los elementos auxiliares de las instalaciones, tales como apoyos, aisladores, herrajes, etc., resultan más económicos para el aluminio, se comprenderá fácilmente que el aluminio haya sustituido en gran parte al cobre para muchas aplicaciones eléctricas, sobre todo para la fabricación de conductores destinados a las líneas aéreas. En la página siguiente se incluye la tabla 12 comparativa de las propiedades de ambos metales.

A continuación, se citan algunas aplicaciones típicas del aluminio en Electrotecnia:

a) Conductores para líneas eléctricas aéreas (véase, para más detalle, el volumen de esta obra dedicado a "Instalaciones eléctricas generales").

b) Conductores para líneas eléctricas interiores (véase el volumen de esta obra dedicado a "Instalaciones eléctricas interiores").

c) Devanados para máquinas eléctricas y transformadores (véase el volumen de esta obra dedicado a "Bobinados de máquinas eléctricas").

d) Barras de instalaciones de distribución (véase el volumen de esta obra dedicado a "Estaciones de transformación y distribución").

e) Aparatos eléctricos. El aluminio se emplea, por su amagnetismo, en las piezas e instrumentos que provocarían pérdidas y calentamientos si estuvieran fabricadas de materiales magnéticos.

f) Condensadores. Actualmente, el aluminio es el metal más utilizado como electrodo en los condensadores industriales con aislamiento de papel; para esta aplicación, el aluminio se dispone en forma de banda continua de 6 a 8 micras de espesor, que se arrolla sobre el aislamiento. También se emplea en los condensadores electroquímicos utilizados en aplicaciones de alta frecuencia: el ánodo está constituido por aluminio muy puro, al 99,99 %, mientras que el cátodo es aluminio comercial al 99 % de pureza. También los condensadores variables para radiotecnia se fabrican de aluminio.

TABLA 12. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL COBRE Y DEL ALUMINIO

		Aluminio	Cobre
A IGUAL CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	Relación de las secciones	1,64	1
	Relación de los diámetros	1,[illegible]	1
	Relación de los pesos	0,50	1
	Relación de las cargas de rotura	0,78	1
A IGUAL CALENTAMIENTO	Relación de las secciones	1,405	1
	Relación de los pesos	0,424	1
A IGUAL SECCION	Relación de las conductividades	0,61	1
	Relación de los pesos	0,30	1

Aleaciones de aluminio

El aluminio puede alearse con cierto número de otros metales, con el consiguiente aumento de resistencia mecánica y dureza. En algunas aleaciones, todavía puede aumentarse más la resistencia mecánica mediante un tratamiento térmico adecuado. Los metales más empleados en estas aleaciones son: cobre, silicio, manganeso, magnesio, cromo y zinc.

El aluminio puro, aun cuando haya sido preparado para tener resistencia mecánica, es siempre un metal relativamente débil desde este punto de vista. En las piezas fundidas se obtiene un aumento de la resistencia mecánica por adición de algún elemento de aleación. Las aleaciones más adecuadas para el laminado en frío contienen, por lo general, un contenido de aluminio comprendido entre 90 y 95 %.

Mediante elementos de aleación adecuados y con apropiados tratamientos térmicos, se pueden obtener aleaciones con las que es posible alcanzar cargas de rotura del orden de 58 kg/mm² (para el aluminio recocido, la carga de rotura es de 7 a 11 kg/mm²), con pesos específicos comprendidos entre 2,65 y 3 g/cm³.

Desde el punto de vista electrotécnico tienen especial importancia las aleaciones de aluminio empleadas para conductores de líneas eléctricas aéreas que tiene las características de una conductividad eléctrica algo menor que la del aluminio comercial, pero una resistencia mecánica bastante mayor, gracias a la aportación de diversos elementos de aleación y a tratamientos térmicos y mecánicos especiales. Estas aleaciones se conocen comercialmente con los nombres de *Almelec*; *Aldrey* y otros, y aunque sus procedimientos de fabricación son distintos, todas tienen en común una composición química muy parecida y análogas propiedades mecánicas y eléctricas. Su composición química aproximada, es la siguiente:

Aluminio	98,7 %
Magnesio	0,5 %
Silicio	0,5 %
Hierro	0,3 %

A este respecto, las normas españolas UNE establecen que la aleación de aluminio para conductores de líneas eléctricas aéreas, ha de tener una composición que incluya el aluminio como elemento fundamental, con adición de magnesio y de silicio. El resto de los elementos constituyentes se considerarán como impurezas y no debe exceder de 0,5 % y la proporción de cobre no debe exceder, en ningún caso, de 0,01 %. Entonces la aleación de aluminio resultante tiene una resistencia a la corrosión por lo menos igual a la del aluminio comercial.

A continuación, se expresan en una tabla las más interesantes características de la aleación de aluminio conocida con el nombre comercial de *Aldrey*.

TABLA 13. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO "ALDREY"

Peso específico, en gr/cm³	2,7
Conductividad a 20 °C, en siemens. m/mm²	31,95
Resistividad a 20 °C, en ohmios. mm²/m	0,0313
Coeficiente de temperatura	0,0036
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	6 500
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	35
Límite de elasticidad, en kg/mm²	28
Alargamiento a la rotura, en %	2 ... 5
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	23 × 10⁻⁶ por °C

Las aleaciones de aluminio que no tienen este metal como elemento base, se estudian en los parágrafos en los que se tratan las aleaciones con estos elementos básicos.

Plata

La *plata* es un metal de color blanco puro, con destellos metálicos, gracias a su gran poder de reflexión; en láminas muy delgadas es de color azul, vista por transparencia.

Es el mejor conductor eléctrico actualmente conocido, ya que su conductividad relativa es 10 % superior a la del cobre. Es muy maleable y dúctil, casi tan tenaz como el cobre. Su carga de rotura es de 28,5 kg/mm² a 0° C y disminuye cuando la temperatura se eleva, sube hasta 37,4 kg/mm² a la temperatura de −182° C. La plata puede soldarse consigo misma por martilleo, a una temperatura inferior a la de fusión.

La plata pura tiene tendencia a picarse en contacto con el ambiente; por otra parte, en atmósferas sulfurosas se forma una capa superficial de sulfuro de plata, que tiene gran resistencia de contacto. Estos inconvenientes se solucionan por aleación de la plata con otros metales.

Generalmente, en el mercado se obtiene de tres clases:

1. *Plata fina*, con 99,95 % de plata
2. *Plata Sterling*, con 92,5 % de plata y 7,5 % de cobre
3. *Plata de monedas*, con 90 % de plata y 10 % de cobre.

La *plata Sterling* y la *plata de monedas* son más duras que la *plata fina*, aunque su resistencia de contacto también es mayor; en muchas aplicaciones, estas aleaciones se utilizan en lugar de la plata fina.

Se conocen diversas aleaciones de la plata con cobre, níquel, cadmio, hierro, carbono, tungsteno y molibdeno y otros metales, que se emplean en lugar de la plata fina en aplicaciones electrotécnicas que requieren mayor dureza y mejor resistencia al desgaste.

A continuación se exponen en una tabla las más interesantes características de la plata.

TABLA 14. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLATA

Símbolo químico	Ag
Número atómico	46
Peso atómico	106,7
Peso específico, en gr/cm³	10,42 ... 10,53
Conductividad eléctrica a 20 °C, en siemens. m/mm²	61,43
Resistividad eléctrica a 20 °C, en ohmios. mm²/m	0,01628
Coeficiente de temperatura	0,0038
Conductividad calorífica a 0 °C, en calorías/°C/cm²/cm	0,997
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	18,9 × 10^{-6} por °C
Punto de fusión, en °C	960,5
Calor latente de fusión, en calorías/gr	24,3
Calor específico medio (de 20 a 900 °C), en calorías/gr por °C	0,065
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	7.000 ... 8.000
Resistencia a la tracción a 0 °C, en kg/mm² (carga de rotura)	28,5

Entre las principales aplicaciones electrotécnicas de la plata y sus aleaciones, se pueden citar:

a) como cortacircuitos fusibles; por ser muy pequeña su constante de tiempo, ofrece gran seguridad de funcionamiento, sobre todo para altas tensiones de servicio.
b) en construcción de piezas de aparatos eléctricos donde se requiera pequeña resistencia de contacto y cierta inalterabilidad al calor o al arco eléctrico (por ejemplo, en contactos de ruptura, relés de alta sensibilidad, etc.).
c) en instrumentos electromédicos (por ejemplo, termocauterios).
d) en fabricación de aparatos de medida de precisión (por ejemplo, espirales de llegada de corriente para instrumentos de laboratorio, hilos de torsión para galvanómetros, etc.).
e) como revestimiento de protección sobre conductores eléctricos (hilos plateados).

Níquel

El *níquel* es un metal blanco brillante, que admite un bello pulimento. El níquel puro es muy maleable, por lo que puede forjarse, prensarse, laminarse y estirarse, tanto en frío como en caliente. Sin embargo, el níquel comercial, obtenido por reducción del óxido, es frágil, a causa de la presencia de trozos de azufre; este inconveniente puede evitarse por adición de una pequeña cantidad de manganeso o de magnesio, antes de colar el níquel.

Tiene gran resistencia a la tracción y es también muy resistente al desgaste. Resulta inalterable en el aire húmedo, en el agua potable y en el agua de mar. Resiste bien la mayor parte de los compuestos químicos.

Tiene una conductividad eléctrica relativa, respecto al cobre recocido, ~~que está comprendida entre 12 y 14 %, y el coeficiente de temperatura está comprendido entre 0,0055 y 0,0061~~. A bajas temperaturas aumenta muy rápidamente la conductividad y disminuye el coeficiente de temperatura, lo que parece indicar que tiene propiedades superconductoras.

Las más importantes aplicaciones electrotécnicas del níquel comercial están en la fabricación de acumuladores hierro-níquel y cadmio-níquel. Desde el punto de vista electrotécnico, son mucho más interesantes las aleaciones de níquel, cuya características y campos de aplicación se estudian en el siguiente parágrafo.

A continuación, se indican en una tabla las más interesantes características del níquel comercial.

TABLA 15. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL NÍQUEL

Símbolo químico	Ni
Número atómico	28
Peso atómico	58,71
Peso específico, en gr/cm³	8,90
Conductividad eléctrica a 20 °C, en siemens. m/mm²	14,62
Resistividad eléctrica a 20 °C, en ohmios. mm²/m	0,0684
Coeficiente de temperatura	0,006
Conductividad calorífica a 20 °C, en calorías/cms. por °C	0,22
Coeficiente de dilatación lineal (de 20 °C a 100 °C)	13,3 × 10⁻⁶ por °C
Punto de fusión, en °C	1 453
Punto de ebullición, en °C	2 730
Calor latente de fusión, en calorías/gr	74
Calor específico medio, en calorías/gr por °C	0,105
Equivalente electroquímico, en gr/Amp por hora	1,0946
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	20 000
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	40 ... 50
Alargamiento a la rotura, en %	22

Las propiedades magnéticas del níquel se estudiarán en los capítulos dedicados a los materiales magnéticos.

Aleaciones de níquel

Las aleaciones de níquel se emplean sobre todo para la construcción de resistencias eléctricas, ya que tienen las características físicas, químicas y eléctricas, que se requieren para aplicaciones de calefacción eléctrica. Recordaremos que estas características requeridas, son las siguientes:

a) Resistividad relativamente elevada, para limitar la intensidad de corriente a un valor conveniente y reducir las dimensiones del elemento de calefacción.

b) Coeficiente de temperatura pequeño y, a ser posible, positivo y sensiblemente constante en un gran intervalo de temperatura, dentro de los límites de utilización.

c) Punto de fusión muy superior a la temperatura máxima de calentamiento, para evitar la destrucción, por fusión o por cortocircuito, del elemento de resistencia.

d) Resistencia mecánica suficiente, no sólo a la temperatura normal ambiente, sino también a la temperatura de funcionamiento prevista. El material no debe presentar deformación apreciable, ni aunque se produzcan variaciones bruscas de temperatura; también debe resistir los choques y vibraciones.

e) Conductividad calorífica reducida, para evitar pérdidas de calor en sus extremos y facilitar la colocación de tomas y terminales.

f) El material empleado ha de ser amagnético y homogéneo, sin que su estructura sufra modificación a la temperatura de funcionamiento.

g) Coeficiente de dilatación muy pequeño.

h) Gran resistencia a los agentes exteriores y a las temperaturas de funcionamiento previstas, sobre todo en lo que se refiere a la oxidación, a los gases desprendidos por los cuerpos caldeados, al ataque químico de los materiales en contacto, etc.

i) Gran duración de servicio.

A continuación, se describen las más importantes aleaciones de níquel, utilizadas en Electrotecnia.

Aleaciones de cobre y níquel. Estas aleaciones, conocidas también con los nombres de *cuproníqueles, bronces al níquel, Cuni,* etc., se han descrito ya en el parágrafo "Bronces" de este mismo capítulo, al que remitimos al lector interesado en sus características y aplicaciones; cuando estas aleaciones se emplean como resistencias para calefacción eléctrica, la temperatura de funcionamiento varía entre 500 y 700° C, correspondiendo las de temperatura más elevada, a las que tienen mayor contenido de cobre.

Aleaciones de hierro y níquel. Cuando las aleaciones de hierro y níquel se emplean para aplicaciones eléctricas, reciben el nombre general de *ferroníqueles,* reservándose el nombre de "aceros al níquel" cuando se intenta aprovechar sus propiedades ferromagnéticas. Las diferencias entre un ferroníquel (que ha de ser amagnético) y un acero al níquel (que ha de ser ferromagnético), son estructurales y el estudio de estas diferencias estructurales nos llevaría muy lejos en nuestro

propósito. Creemos que lo más interesante para el electricista es conocer las posibilidades de estas aleaciones.

Los ferroníqueles se emplean para la fabricación de resistencias eléctricas, reóstatos, resistencias de calefacción, etc., cuya temperatura de funcionamiento no sobrepase unos 500° C. Algunas de estas aleaciones tienen interesantes propiedades:

Por ejemplo, la aleación cuyos nombres comerciales son *Invar*, *Nilvar*, etc., según los fabricantes, y constituida por 36 % de níquel y 64 % de hierro, tiene un coeficiente de dilatación lineal muy pequeño (1×10^{-6} por °C) que, además, permanece prácticamente constante para la gama de temperaturas comprendida entre −30° C y +100° C. Por otra parte, este coeficiente de dilatación lineal es semejante al del vidrio, lo que hace posible la soldadura directa con este último material; debido a esta circunstancia, estas aleaciones se emplean, sobre todo en la fabricación de resistencias de calefacción para tubos electrónicos de vacío y en atmósferas de gas. Cualquier adición de impurezas, tales como manganeso, cromo, carbono, etc., produce un aumento de dicho coeficiente de dilatación lineal.

Aleaciones de cromo níquel. Si se agrega cromo al níquel, baja el punto de Curie de este último, es decir, la temperatura a la que pierde sus propiedades magnéticas. De esta forma, se reducen las anomalías inherentes al carácter magnético del níquel: a partir de un contenido de 3 % de cromo, apenas son ya percep bles las anomalías de la dilatación y de la resistividad. Además, con la adición de cromo, aumenta la resistividad, la dureza y la tenacidad, tanto en frío como en caliente, y se aprecia una pequeña influencia sobre el peso específico, el calor específico, el coeficiente de dilatación y el módulo de elasticidad.

Las aleaciones de cromo y níquel, calentadas al aire, se recubren de una delgada capa protectora de óxido, que es adherente, muy sólida y no se resquebraja por efectos de calentamiento y enfriamientos alternados; todas estas características hacen que las aleaciones de cromo y níquel resulten muy apropiadas como resistencias de calefacción. Estas aleaciones no son atacadas por la atmósfera húmeda, ni por los ácidos y álcalis diluidos, siendo especialmente inalterables a la acción del ácido sulfúrico.

Las temperaturas límites de servicio están comprendidas entre 900° C y 1 100° C. Algunas veces se agregan pequeñas cantidades de otros cuerpos (manganeso, magnesio, silicio, carbono, etc.) con objeto de facilitar su laminación y su estiramiento.

Aleaciones de hierro, cromo y níquel. La adición de hierro a las aleaciones de cromo y níquel aumenta la resistencia de estas a la oxi-

dación y a los agentes químicos; además, como estas aleaciones son más fáciles de trabajar y menos costosas que las anteriores, se emplean mucho más que aquéllas.

Normalmente, se denominan *ferroníqueles cromados* cuando son utilizadas por sus propiedades eléctricas, reservándose el nombre de "aceros al níquel-cromo" cuando se emplean por sus cualidades magnéticas; como en el caso de los ferroníqueles, estudiados anteriormente, existen diferencias estructurales entre los ferroníqueles cromados y los aceros al níquel-cromo, que determinan sus campos de aplicación como materiales eléctricos y como materiales magnéticos, respectivamente.

Las aleaciones que estamos tratando presentan gran variedad en la proporción de sus componentes: por adición de pequeñas cantidades de cobalto, silicio, y aluminio, se mejoran sus propiedades de resistencia a la oxidación, producida por su calentamiento en el aire; por el contrario la adición de manganeso o de molibdeno resultan perjudiciales desde este punto de vista. En presencia de humos sulfurosos, es conveniente la sustitución de una parte del contenido de níquel, por manganeso.

Las aleaciones de hierro, cromo y níquel solamente se utilizan para temperaturas de servicio hasta 900° C aunque, generalmente, se emplean para temperaturas bastantes más bajas.

Por otra parte, estas aleaciones tienen las propiedades de tenacidad en caliente, gran resistividad, etc., que las hacen adecuadas para su utilización en los hornos para tratamientos térmicos, reóstatos, resistencias de calefacción, etc.

Aleaciones de manganeso y níquel. Ya hemos dicho anteriormente que la adición de manganeso en las aleaciones de níquel disminuye la resistencia de éstas a la oxidación pero aumenta su resistencia a los humos sulfurosos.

Las aleaciones de manganeso y níquel tienen una resistividad menor que las anteriores pero su coeficiente de dilatación lineal permanece prácticamente constante en una amplia gama de temperaturas; por ejemplo, en la aleación denominada comercialmente *Magno*, el coeficiente de dilatación lineal es $14{,}3 \times 10^{-6}$ por °C, valor que permanece constante entre 20° C y 500° C. Las temperaturas de servicio de estas aleaciones alcanzan hasta 1 350° C aunque, por lo general, no se sobrepasan los 1 100° C.

Resumen. Como resumen del presente parágrafo, se indican a continuación, en una tabla, las características más interesantes de algunas aleaciones de níquel empleadas en Electrotecnia.

TABLA 16. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS ALEACIONES DE NÍQUEL EMPLEADAS COMO MATERIALES CONDUCTORES.

Material	Composición	Designación general	Peso específico gr/cm³	Conductividad $\frac{m}{mm^2}$	Resistividad $\Omega \frac{mm^2}{m}$	Coeficiente de temperatura	Resistencia a la tracción kg/mm²	Temperatura máxima de trabajo °C	Coeficiente de dilatación lineal por °C	Otras denominaciones comerciales
Aleación Hopkinson	25 % Ni; 75 % Fe	Aleación hierro-níquel (Ferroníquel)	8,10	1,203	0,831	0,0011	52,73	400	14 × 10⁻⁶	Phenix; Cifnet
Aleación 42	42 % Ni; 58 % Fe	» » » »	8,12	1,503	0,665	0,0012	70,31	1 100	5,3 × 10⁻⁶	—
Aleación 46	46 % Ni; 54 % Fe	» » » »	8,17	2,188	0,457	0,0027	70,31	1 100	8,5 × 10⁻⁶	—
Aleación 52	51 % Ni; 49 % Fe	» » » »	8,25	2,315	0,432	0,0029	70,31	1 100	9,5 × 10⁻⁶	—
Hytemco	72 % Ni; 28 % Fe	» » » »	8,46	5,00	0,200	0,0045	49,21	500	15 × 10⁻⁶	—
Invar	36 % Ni; 64 % Fe	» » » »	8,08	1,176	0,850	0,0014	49,22	500	1 × 10⁻⁶	Nilvar; Platinite; Dilver
Tico	27,5 % Ni; 72,5 % Fe	» » » »	8,10	1,203	0,831	0,0011	52,73	400	14 × 10⁻⁶	—
Chromel A	80 % Ni; 20 % Cr	Aleación cromo-níquel	8,4	0,926	1,08	0,00013	66,8	1 100	17 × 10⁻⁶	Nichrome V; Karma; Kronax
Kromore	85 % Ni; 15 % Cr	» » »	8,9	1,057	0,946	0,00242	56,24	1 100	15 × 10⁻⁶	Rayo; Redray
Acme	30 % Ni; 5 % Cr; 65 % Fe	Aleación hierro-cromo-níquel	8,15	1,145	0,873	0,00072	70,30	1 000	—	—
Aleación 14	42 % Ni; 5,5 % Cr; 52,5 % Fe	» » » »	8,10	1,074	0,931	0,0025	70,30	1 100	10,8 × 10⁻⁶	—
Aleación 193	30 % Ni; 2 % Cr; 67 % Fe; 1 % Mn	» » » »	8,15	1,147	0,872	0,00072	60	650	17,1 × 10⁻⁶	—
Calido	59 % Ni; 16 % Cr; 25 % Fe	» » » »	8,15	0,909	1,100	0,00025	63,27	1 000	16 × 10⁻⁶	—
Chromax	30 % Ni; 20 % Cr; 50 % Fe	» » » »	7,95	1,000	1,000	0,00031	49	1 100	15,8 × 10⁻⁶	—
Chromel C	60 % Ni; 16 % Cr; 24 % Fe	» » » »	8,24	0,893	1,120	0,00017	67	900	17 × 10⁻⁶	Glowray
Chromel D	30 % Ni; 20 % Cr; 50 % Fe	» » » »	7,94	1,005	0,995	0,00032	49	500	16 × 10⁻⁶	—
Comet	30 % Ni; 4,75 % Cr; 62,25 % Fe	» » » »	8,15	1,053	0,950	0,00088	39	600	15 × 10⁻⁶	—
Excello	85 % Ni; 14 % Cr; 0,5 % Fe; 0,5 % Mn	» » » »	—	1,087	0,920	0,00016	—	1 150	—	—
Nichrome	61 % Ni; 15 % Cr; 24 % Fe	» » » »	8,25	0,893	1,120	0,00017	85	980	17 × 10⁻⁶	—
Nirex	79 % Ni; 13 % Cr; 8 % Fe	» » » »	8,55	1,019	0,981	0,00012	91,5	1 100	16,1 × 10⁻⁶	Inconel
Peerless	78,5 % Ni; 16 % Cr; 3 % Fe; 2 % Mn	» » » »	8,05	1,047	0,955	0,00018	—	1 100	—	—
Superior	78 % Ni; 19,5 % Cr; 0,5 % Fe; 2 % Mn	» » » »	8,2	0,971	1,030	0,00011	—	1 100	—	—
Aleación R-63	95 % Ni; 4 % Mn; 1 % Si	Aleación manganeso-níquel	8,72	4,000	0,250	0,0027	91,5	1 100	15,2 × 10⁻⁶	—
Alumel	94 % Ni; 2,5 % Mn; 0,5 % Fe; 2 % Al; 1 % Si	» » »	—	3,003	0,333	0,0012	—	1 250	—	—
Magno	95,5 % Ni; 4,5 % Mn	» » »	8,75	5,000	0,200	0,0036	63,27	1 100	14,3 × 10⁻⁶	—
Manganeso-níquel	98 % Ni; 2 % Mn	» » »	8,8	7,143	0,140	0,0045	64	1 100	14,6 × 10⁻⁶	—

Hierro y acero

En el presente parágrafo se estudiarán el *hierro* y el *acero* pero solamente considerándolos como materiales conductores. Las aplicaciones de estos materiales a la construcción de máquinas queda fuera de los límites de esta obra, a pesar de su innegable importancia. En un próximo capítulo, se estudiarán estos materiales por sus propiedades magnéticas.

El hierro es un metal duro y tenaz, de brillo plateado. Es fuertemente ferromagnético pero su magnetismo remanente es muy pequeño, por lo que pierde pronto sus propiedades magnéticas. Se ablanda al rojo y puede soldarse fácilmente al blanco. El punto de fusión del hierro puro es más elevado que el del hierro dulce y el acero.

El hierro es químicamente muy sensible y se disuelve en la mayoría de los ácidos diluidos, con liberación de hidrógeno. No sufre cambios en el aire seco, pero en el seno de atmósferas húmedas, sufre los efectos de la corrosión, formando orín o herrumbre (óxido férrico hidratado); esta corrosión se acelera en presencia de anhídrido sulfuroso y de anhídrido carbónico.

El hierro forma numerosos compuestos con carbono, azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y otros elementos químicos. Forma también aleaciones con numerosos elementos metálicos: manganeso, níquel, cobalto, silicio, cromo, tungsteno, etc.

El elemento químico hierro constituye la base de todos los hierros comerciales y aceros pero, para definir estos materiales con relativa exactitud, resulta necesario indicar, no solamente los componentes que los constituyen sino también los procedimientos de fabricación de estos materiales. Efectivamente, el hierro y el acero son, comercialmente, siempre diferentes y, además, se obtienen en muy diversas variedades comerciales. Aun los que se consideran como tipos comunes de acero son materiales bastante complicados cuya definición como aleaciones de hierro con ciertos elementos resulta insuficiente, ya que las aleaciones pueden presentar muchas formas distintas y tener propiedades distintas que dependen, no sólo de las proporciones de los elementos que constituyen la aleación, sino también de los métodos de fabricación de estas mismas aleaciones. Los materiales a base de hierro que cabe considerar en este parágrafo, son los siguientes:

Hierro dulce. Es un material férreo obtenido de una masa de solidificación de partículas pastosas de hierro metálico altamente refinado a la cual, sin fusión subsiguiente, se incorpora una pequeña cantidad de escoria, uniformemente distribuida. El hierro dulce es dúctil, tenaz, tiene buena resistencia al choque y una resistencia a la tracción comprendida entre 31,6 y 38,70 kg/mm².

Acero al carbono. Es una aleación binaria de hierro y carbono, en la cual el carbono es el elemento principal que determina las propiedades mecánicas, aunque existan pequeñas cantidades de manganeso y silicio, y, también trazas de fósforo y azufre, consideradas como impurezas. El número total de aceros comerciales es muy considerable y sus propiedades mecánicas están determinadas también, en buena parte, por el tratamiento térmico. En general, la resistencia a la tracción y la dureza de un acero al carbono, aumenta con el contenido de carbono, manganeso y fósforo, mientras que la ductilidad del material disminuye al aumentar la resistencia mecánica. Las propiedades de resistencia a la tracción del acero al carbono se modifican notablemente por el trabajado en frío o el tratamiento térmico y, al margen de posibles modificaciones, aumenta generalmente con el contenido de carbono. La resistencia a la tracción del acero al carbono está comprendida entre 70 y 200 kg/mm², de acuerdo con las consideraciones expuestas.

Acero de aleación. Cuando, además del carbono, se agregan elementos de aleación al hierro, para mejorar sus propiedades mecánicas, se obtienen los aceros de aleación. El tratamiento térmico resulta entonces una operación necesaria en la fabricación y empleo de los aceros de aleación ya que solamente por templado y revenido adecuados pueden obtenerse dichas mejoras de las propiedades mecánicas. Como elementos de aleación, se emplean el manganeso, silicio, níquel, cromo, molibdeno, tungsteno, aluminio, etc., obteniéndose diferentes características de resistencia mecánica, resistencia a la oxidación, etc. Las propiedades mecánicas de los aceros de aleación varían dentro de amplios límites, dependiendo del tamaño, de la composición y del tratamiento térmico. Los aceros de aleación tienen resistencias a la tracción comprendidas entre 50 y 100 kg/mm², de acuerdo con las consideraciones anteriormente expuestas.

Los alambres y cables de hierro y de acero para la intemperie, deben protegerse contra la corrosión, por medio de un revestimiento de zinc, operación denominada *galvanizado*. El galvanizado puede hacerse por un baño en caliente o electrolíticamente, siendo más empleado el galvanizado en caliente, ya que permite la obtención más rápida de una película más gruesa de zinc. El galvanizado, por sí mismo, no resulta inmune al ataque atmosférico y se desintegra con una rapidez que depende de las condiciones ambientales; en las condiciones más favorables, dura de 10 a 15 años, después, de los cuales, los alambres y cables de hierro y acero se oxidan y pierden sus propiedades mecánicas. Existen además otras causas que desgastan la capa de zinc del galvanizado, como son los roces con aisladores, los pequeños arcos intermitentes, etcétera. También pueden resultar muy perjudiciales para el galvanizado los gases ácidos de las zonas industriales. A pesar de todos estos inconvenientes, el galvanizado constituye el mejor procedimiento de

protección conocido hasta ahora, de los alambres y cables de hierro y acero. Naturalmente podría emplearse para estas aplicaciones el acero inoxidable, pero su elevado precio lo hace prohibitivo.

El acero al carbono o el acero poco aleado galvanizados se emplean en la fabricación de conductores eléctricos, generalmente en forma de cables, y aprovechando su baratura en comparación con los conductores de cobre y de aluminio, y su elevada resistencia mecánica. Pero, debido a su elevada resistividad, se emplean poco para conductores activos; su principal campo de aplicación está en los conductores de tierra. Además, hay que tener en cuenta que, desde el punto de vista económico, debe procederse, de tiempo en tiempo a la sustitución de los conductores oxidados, por las razones expuestas en el párrafo anterior. En la actualidad, solamente se emplean estos materiales en algunas instalaciones rurales de alta tensión, habiendo fracasado los intentos de aplicarlos a instalaciones de baja tensión debido a que las elevadas intensidades de corriente que atraviesan los conductores, provocan inadmisibles caídas de tensión, debido a su elevada resistividad, muy superior a la del cobre o el aluminio. Como se ha dicho anteriormente, su más interesante aplicación es como conductores de tierra y a ella haremos referencia en lo que sigue.

A continuación, se exponen en una tabla las características generales del acero galvanizado.

TABLA 17. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO ELECTROTÉCNICO

Peso específico, en gr/cm³	7,8
Resistividad a 20 °C, en ohmios. mm²/m	0,11 ... 0,22
Coeficiente de temperatura	0,006
Coeficiente de dilatación lineal	$11{,}5 \times 10^{-6} \times$ por °C
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	22 000 ... 29 600
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	100 ... 120
Límite de elasticidad, en kg/mm²	90 ... 95
Alargamiento a la rotura	5 ... 7

Según prescripciones reglamentarias, la composición química del acero utilizado como conductor de tierra, habrá de ser la siguiente:

Carbono	0,55 a 0,75 %
Manganeso	0,60 a 1,15 %
Silicio	No superior a 0,20 %
Azufre	No superior a 0,045 %
Fósforo	No superior a 0,040 %

Desde hace algún tiempo se emplean también conductores compuestos de cobre-acero, en los que se pretende combinar las buenas propiedades eléctricas del cobre, con las excelentes propiedades mecánicas del acero. El conductor resultante tiene, naturalmente, propiedades intermedias entre el cobre y el acero, siendo superior al cobre en resistencia mecánica y superior al acero en conductividad eléctrica.

Estos conductores están constituídos por un alma de acero y una envolvente de cobre. Los primeros conductores de este tipo, se fabricaban con ambos metales yuxtapuestos, sin soldadura de ninguna clase; se comprobó que su resultado no era satisfactorio, debido a la corrosión electrolítica del hierro sobre todo en los puntos en que ambos metales (cobre y hierro) estaban expuestos a la intemperie, como sucedía en los empalmes y derivaciones.

Actualmente, se emplean procedimientos que permiten la soldadura o la unión molecular de los dos metales; el procedimiento de fabricación más utilizado consiste en recubrir el lingote de acero con un fundente especial, colocarlo en un molde vertical cerrado en su parte inferior calentar después el lingote y el molde hasta una temperatura adecuada y colar cobre alrededor del lingote; el material resultante se lamina después en caliente en varillas y, finalmente, se estira en frío hasta convertirlo en alambre. También se utiliza otro procedimiento que consiste en recubrir electrolíticamente una varilla de acero con una capa de cobre, trefilando después en frío. El material fabricado de esta forma, se conoce con varios nombres comerciales: *Multimetal*, *Copperweld*, etc. Se utiliza en forma de hilo y de cable y resulta muy apropiado en los casos en que las consideraciones de orden mecánico resultan determinantes, como sucede cuando se trata de instalar líneas en que la intensidad de corriente es pequeña y deben preverse vanos de gran longitud por cruce de barrancos, ríos de gran anchura, etc. Este material conductor también encuentra aplicación para conductores de tierra en líneas a tensión muy elevada.

A continuación, se exponen en una tabla las características más importantes del material conductor conocido con la denominación comercial de Multimetal.

TABLA 18. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MULTIMETAL

Peso específico, en gr/cm³	8,05
Conductividad a 20 °C, en siemens. m/mm²	14,29
Resistividad a 20 °C, en ohmios. mm²/m	0,07
Coeficiente de temperatura	0,004
Coeficiente de dilatación lineal	12×10^{-6} por °C
Módulo de elasticidad, en kg/mm²	10 000
Resistencia a la tracción, en kg/mm² (carga de rotura)	70 ... 100
Alargamiento a la rotura, en %	1

Aleaciones de hierro

En Electrotecnia, las aleaciones de hierro se emplean, sobre todo, como materiales resistentes, para la fabricación de resistencias eléctricas, reóstatos, etc. En el parágrafo dedicado a las aleaciones de níquel se estudian las aleaciones de hierro y níquel y las aleaciones de hierro, cromo y níquel. En el presente parágrafo se estudiarán las *aleaciones de hierro, cromo* y *aluminio*, que se emplean para temperaturas de servicio comprendidas entre 100° C y 1 300° C, es decir, superiores a las anteriores.

Estas aleaciones contienen de 25 a 30 % de cromo, 2 a 5 % de aluminio y el resto está constituido por cantidades variables de hierro, cobalto, magnesio, etc. La fabricación de estas aleaciones es muy delicada. Quedan protegidas por una capa superficial de óxido, y resisten mucho mejor que las aleaciones de níquel-cromo, a la oxidación y a la acción de los gases. Tienen el inconveniente de que, cristalizan en caliente, lo que las hace frágiles a las elevadas temperaturas de funcionamiento; su utilización requiere por esta causa, el empleo de materiales refractarios especiales en los hornos de cementación o de fusión donde deban emplearse. Por otra parte, soportan mal las atmósferas reductoras y el vapor de agua.

A continuación, se exponen en una tabla las características de algunas de estas aleaciones, advirtiendo que ciertos datos no se conocen con precisión por lo cual se exponen solamente a título informativo.

TABLA 19. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS ALEACIONES HIERRO-CROMO-ALUMINIO

Material	Composición	Peso específico gr/cm³	Resistividad $\Omega \frac{mm^2}{m}$	Coeficiente de temperatura	Temperatura máxima de trabajo °C
Kanthal Ara	62 % Fe; 23 % Cr; 5 % Al; 22,5 % Co	7,10	1,45	0,00006	1 200
Kanthal A	69 % Fe; 23 % Cr; 4,5 % Al; 2 % Co	7,20	1,35	0,00008	1 200
Kanthal D	74 % Fe; 22 % Cr; 4 % Al; 1,5 % Co	1,30	1,30	0,00010	1 200
Megapyr	65 % Fe; 30 % Cr; 5 % Al	7,10	1,44	0,00003	1 200

Las principales características de tipo general de estas aleaciones, son las siguientes:

a) elevada resistividad
b) pequeño valor del coeficiente de temperatura
c) peso específico relativamente pequeño
d) coeficiente de dilatación relativamente alto, lo que puede constituir un inconveniente.

Carbono y grafito

En la naturaleza, el *carbono* se presenta en tres variedades diferentes:

1. El *diamante*, cristal muy duro, de muy pequeña conductividad y sin aplicación práctica en Electrotecnia.
2. El *carbono amorfo*, en sus variedades: turba, lignito, hulla, antracita, de pequeña conductividad y sin aplicación práctica en Electrotecnia.
3. El *grafito* o *plombagina* variedad cristalizada blanda del carbono y buen conductor de la electricidad; es el único carbón material utilizado en Electrotecnia y se presenta en tres formas distintas:

a) *Grafito en hojuelas* o *en agujas* de 1 a 2 mm de longitud.
b) *Grafito en bloques*, en forma de pedazos compactos del tamaño de una nuez.
c) *Grafito microcristalino*, que solamente se diferencia del anterior en el tamaño de los cristales que lo constituyen y en que éstos no pueden aislarse o separarse.

En realidad, parece ser que solamente existe una variedad de grafito, que es un cuerpo puro, cualquiera que sea su origen. Las propiedades del grafito, tales como conductividad eléctrica, aspecto brillante o mate, etc., dependen de causas circunstanciales.

En Electrotecnia se emplean también diversos carbones artificiales, entre los que se pueden citar:

a) *Grafitos artificiales*, obtenidos por tratamiento de las antracitas naturales (*grafitos de antracita*) o por diversos tratamientos especiales (*grafito Acheson*).
b) *Grafito de retorta o carbón de retorta*, que se produce en las fábricas de gas y se presenta en forma de coque duro, difícil de pulverizar, abrasivo y de conductividad eléctrica media.

c) *Coque en polvo*, de propiedades semejantes al anterior y de conductividad eléctrica mediocre.
d) *Negro de humo*, presentado en forma de polvo muy fino, de tono variable entre el gris y el negro.
e) *Carbón vegetal*, preparado con madera ligera (álamo, haya, caña de cáñamo, etc.) por calcinación de las ramas a unos 280° C, obteniéndose un producto desmenuzable y muy inflamable.
f) *Carbón activado*; como el carbón amorfo absorbe gases en gran proporción, puede aprovecharse esta propiedad. Para ello, se toma una madera, que se calcina por debajo de los 550° C y el carbón resultante se trata con ácido clorhídrico hirviente. Se lava después con agua destilada, se seca y se vuelve a calcinar a una temperatura de unos 1 000° C, esta vez en presencia de una corriente de cloro que arrastra, en forma de sales volátiles, las trazas de sílice y de alúmina. Se vuelve a lavar después y, finalmente, se calcina de nuevo en atmósfera de hidrógeno.

Las propiedades generales y eléctricas de algunos carbones naturales y artificiales empleados en Electrotecnia, se expresan en la tabla de la página siguiente:

Las propiedades citadas en la tabla 20 no son constantes y dependen de muchas circunstancias. A continuación se citan algunas de estas propiedades y las causas que pueden hacerlas variar.

Conductividad eléctrica. La conductividad de un conglomerado de polvos de carbón depende de varios factores, difícilmente evaluables, entre los que se pueden citar:

a) Clase de carbón.
b) Estado de división del polvo de carbón.
c) Diferencia de presión.
d) Materias extrañas que contiene.
e) Mezcla de carbones distintos.
f) Estado de cristalización.

Los experimentos demuestran que la conductividad del carbón depende de la temperatura a la cual ha sido formado. Si la temperatura aumenta, lo hace también la conductividad, acercándose a un valor constante que es, aproximadamente, la resistividad del grafito. Si se calienta el carbón a una temperatura superior a la de su formación, aumenta su conductividad y al enfriarlo no vuelve a su valor original sino al valor que corresponde al carbón formado a la temperatura alcanzada en el recalentamiento.

Coeficiente de temperatura. El coeficiente de temperatura del carbón es negativo, lo que quiere decir que, a diferencia de lo que sucede

TABLA 20. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS CARBONES Y GRAFITOS ELECTROTÉCNICOS

Material	Peso específico (valor medio) gr/cm³	Conductividad (valor medio) siemens · m/mm²	Resistividad (valor medio) ohmios · mm²/m	Resistencia a la tracción (valor medio) kg/mm²
Carbón de coque, calcinado al gas	1,98 ... 2,10	0,022 ... 0,029	35 ... 46	—
Carbón de coque, grafitado	2,20 ... 2,40	—	—	—
Carbón de negro de humo, calcinado al gas	1,80 ... 1,85	0,012 ... 0,017	58 ... 81	—
Carbón de negro de humo, grafitado	1,98 ... 2,08	0,015 ... 0,022	46 ... 66	—
Carbón para electrodos de horno eléctrico	1,54 ... 1,57	0,127 ... 0,195	5,12 ... 7,9	0,33 ... 1,17
Grafito natural	2,25	0,077 ... 0,125	8 ... 13	—
Grafito artificial, para electrodos de hornos eléctricos	1,55 ... 1,56	0,685 ... 0,769	1,30 ... 1,46	0,62 ... 1,34
Grafito artificial, para electrodos de pilas eléctricas	1,55 ... 1,56	0,709 ... 0,769	1,30 ... 1,41	0,49 ... 1,34

con la mayoría de materiales conductores, la resistividad disminuye cuando aumenta la temperatura. El grafito muestra muy poca variación de su resistividad con la temperatura, lo que quiere decir que su coeficiente de temperatura es muy pequeño. El coeficiente de temperatura del carbón y del grafito está comprendido entre, —0,0002 y —0,0004.

Conductividad térmica. De una manera general se puede decir que la conductividad térmica del carbón aumenta cuando se eleva la temperatura; es decir, que esta propiedad, tiene las mismas características que la conductividad eléctrica. La conductividad térmica de estos materiales es muy pequeña (el carbón en polvo es un aislante térmico).

Las aplicaciones de estos materiales en Electrotecnia son muy variadas; a continuación, se citan las más importantes:

a) Electrodos positivos o ánodos para pilas. Están constituidos por un carbón, revestido de bióxido de manganeso y de grafito en polvo; esta última mezcla constituye el despolarizante y su fórmula varía de unos a otros fabricantes. La función del polvo de grafito consiste, por una parte, en reducir la resistencia interior de la pila y, por otra parte, ayudar a la reacción de despolarización, ya que la adición de grafito aumenta la conductividad de la masa despolarizante.

b) Micrófonos de grafito. Se utiliza una masa compuesta por gránulos de antracita grafitizada, ya que el grafito natural no puede emplearse porque resulta muy conductor para esta aplicación. Esta masa se encierra en una cubeta metálica, cerrada por su parte superior con una placa de grafito natural.

c) Electrodos de carbón para electrometalurgia. La fabricación de estos electrodos es semejante a la de los productos cerámicos. Las materias primas, convenientemente pulverizadas y purificadas, se mezclan con alquitrán; a la masa se le da luego la forma deseada mediante fuerte compresión y, finalmente, por una cocción adecuada, se da el electrodo así obtenido la resistencia mecánica y resistividad eléctrica deseadas. Como materias primas se emplean el carbón de retorta, el coque de petróleo y la antracita, mezcladas en proporciones adecuadas. La variación de la resistividad depende de la composición de los electrodos y de su grado de homogeneidad.

d) Escobillas para máquinas eléctricas. Las escobillas para máquinas de colector (máquinas de corriente continua, motores de colector) se hacen de materiales de diferentes calidades, con diferentes características, de acuerdo con las necesidades de servicio. Aunque las escobillas se clasifiquen en dos grandes grupos y se denominan,

respectivamente, *metálicas* y *de carbón*, en realidad, las escobillas metálicas son siempre mixtas, de cobre y grafito y las escobillas de carbón no contienen agregados metálicos, pero el estado y el tratamiento del carbono, proporcionan distintas cualidades según los tipos. Por ejemplo, para máquinas de tensiones muy bajas (hasta 100 V), se utilizan escobillas de grafito; las máquinas de baja tensión (220 V) emplean escobilla de carbón con contenido medio de grafito y las máquinas de alta tensión (superior a 220 V) utilizan normalmente escobillas de carbón con pequeño contenido de grafito. Por otra parte, los turbogeneradores emplean, por lo general, escobillas de grafito puro, obtenido electrolíticamente.

e) Arcos eléctricos. Los carbones y el grafito se utilizan también en las aplicaciones de los arcos eléctricos para soldadura (utilización térmica) y aparatos de proyección cinematográfica (utilización luminosa). El carbón empleado para arcos de utilización térmica, ha de tener una resistividad de 0,015 ohmios mm²/m, mientras que en los arcos de utilización luminosa, se emplean carbones cuya resistividad es del orden de 0,0051 ohmios mm²/m. Deben emplearse mezclas, en proporciones adecuadas de carbones y grafito de alta calidad, para obtener los valores de resistividad anteriormente citados.

Resistencias eléctricas. Las resistencias eléctricas a base de carbón y grafito, se emplean para la obtención de temperaturas superiores a los 1 000° C. Las resistencias de carbón se presentan bajo diversas formas, de las que citaremos las más importantes:

a) Pedazos de carbón de retorta o de grafito, que se colocan en una cubeta de carborundo y se utilizan para la fusión del aluminio.

b) Carbón granulado, que está constituído por grafito o coque y carborundo o silicatos en polvo. Estas mezclas se hacen conductoras a elevadas temperaturas. Los gránulos de carbón cubren la cámara de calefacción y la corriente eléctrica es conducida por dos electrodos de grafito que se introduce a la masa. La temperatura obtenida en un horno de esta clase, es poco uniforme, lo que obliga a una compresión conveniente de la masa, con objeto de regularizar la temperatura.

c) Ladrillo de grafito, que se colocan unos sobre otros y se someten a una presión adecuada.

d) Barras de carbón o de grafito a las que, por lo general, se les da forma de horquilla y se proyectan para obtener temperaturas de hasta 2 200° C. Estas barras se utilizan en los hornos de vacío y la alimentación se efectúa por medio de un transformador de tomas múltiples y de baja tensión. Algunos hornos de esta clase se emplean para soldar el tungsteno en atmósfera de hidrógeno y están provistos de barras de grafito en alvéolos; los electrodos de entrada y salida de corriente son de bronce y van refrigerados mediante una corriente de agua.

e) Tubos de grafito; para obtener suficiente resistencia mecánica y evitar la destrucción rápida del elemento de calefacción por volatilización, debe adoptarse gran sección para los tubos, lo que origina una disminución de la resistividad y un aumento de volumen. Para evitar estos inconvenientes, se dan unos cortes transversales al tubo para aumentar la longitud recorrida por la corriente y, por lo tanto, la resistencia eléctrica; también puede recortarse el tubo en forma de hélice, convenientemente calculada para obtener una resistencia previamente dada y una mayor uniformidad de la temperatura.

f) Crisoles de carbono, fabricados a base de un conglomerado cuyo principal componente es el carbono y colocados en sendos cilindros de cobre, que se enlucen interiormente con algún material calorífugo y refractario y sirven, a la vez, como elementos de calefacción y de recipientes para el metal que se trata de fundir. Estos crisoles se revisten con un material especial que evitar la oxidación e impide el paso de la corriente por el metal calentado.

Metales y aleaciones fusibles

Se denominan así los materiales metálicos cuyos puntos de fusión están comprendidos entre 60° C y 300° C. Entre estos materiales, se incluyen:

a) algunos metales puros: bismuto, cadmio, estaño, plomo.

b) diversas aleaciones, cuyos componentes principales son el bismuto, el cadmio, el estaño y el plomo, en diversas proporciones.

A continuación, se expone una tabla con la composición y puntos de fusión de algunos metales y aleaciones fusibles empleados en Electrotecnia.

Los materiales citados se emplean, sobre todo, como metales de fusión de los cortacircuitos fusibles del tipo abierto o de expulsión. La resistencia del cortocircuito provoca una disipación de energía, liberación de calor y aumento de temperatura. Una corriente suficiente provocará la fusión de la aleación fusible y abrirá el circuito, que de esta forma queda protegido siempre que se apague el arco eléctrico formado. Se prefieren siempre los metales y aleaciones fusibles que se volatilizan fácilmente con el calor del arco, a aquéllos que se funden

TABLA 21. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES FUSIBLES

Material	Composición en %					Punto de fusión °C
	Bismuto	Plomo	Estaño	Cadmio	Mercurio	
Aleación fusible	20	20	—	—	60	20
» »	50	27	13	10	—	72
» »	52	40	—	8	—	92
» »	53	32	15	—	—	96
» »	54	26	—	20	—	103
» »	29	43	28	—	—	132
» »	—	32	50	18	—	145
» »	50	50	—	—	—	160
» »	15	41	44	—	—	164
» »	33	—	67	—	—	166
» »	20	—	80	—	—	200
Estaño	—	—	100	—	—	230
Bismuto	100	—	—	—	—	271
Cadmio	—	—	—	100	—	321
Plomo	—	100	—	—	—	325
Zinc	—	—	—	—	—	412
Aluminio	—	—	—	—	—	600
Plata	—	—	—	—	—	954
Níquel	—	—	—	—	—	1 400

dejando glóbulos de metal caliente. La capacidad de un cortacircuito fusible depende de su forma, dimensiones, construcción y de todos los factores que afectan su capacidad de disipación del calor. A este respecto, cabe hacer las siguientes consideraciones sobre los distintos metales y aleaciones que se pueden emplear como materiales fusibles en los cortacircuitos:

a) La *plata se* emplea para los aparatos que requieren una gran seguridad de desconexión, por su gran precisión para la fusión y su elevada conductividad. Para corrientes de baja intensidad, es el material más adecuado.

b) Las *aleaciones plomo-estaño* y *plomo-bismuto-estaño*, convienen para corrientes de intensidades comprendidas entre 5 y 30 A; por encima de 30 A, la proyección del metal fundido puede resultar peligrosa. No convienen estas aleaciones para las bajas intensidades porque el hilo fusible habría de ser muy fino y se aplastaría con la presión de los tornillos.

c) El *aluminio* tiene poca precisión en su temperatura de fusión pero un retraso muy grande en la fusión por lo que si las láminas o hilos de este metal están bien calibradas, puede emplearse como material fusible en las redes públicas de distribución a baja tensión, ya que soporta fácilmente las sobrecargas instantáneas sin fundirse.

d) El *zinc*, tiene propiedades interesantes como material fusible ya que tiene gran inercia a la fusión, con una masa relativamente pequeña. Pero actualmente apenas se emplea para esta aplicación, debido a que las proyecciones del metal fundido hacen que las cajas o cubiertas de protección se vuelvan conductoras.

e) El *níquel* podría emplearse para bajas tensiones, pero resulta peligroso para tensiones elevadas, debido a que su punto de fusión es muy alto.

f) Ni el *estaño* ni el *plomo* puros deben emplearse como placas o hilos fusibles, debido a su gran inercia a la fusión, unida a su mucha masa, en comparación con otras aleaciones fusibles.

g) El *latón* no debe emplearse nunca, por ser una aleación de composición muy variable y que, por lo tanto, no presenta las debidas garantías de seguridad en el funcionamiento.

En resumen, los materiales más utilizados en los cortacircuitos fusibles, son los que se citan a continuación:

1) la *plata* para circuitos de alta y baja tensión con corrientes de pequeña intensidad.
2) las *aleaciones plomo-estaño* y *plomo-bismuto-estaño* para circuitos de baja tensión con corrientes de intensidad nominal hasta 30 A.
3) el *aluminio*, convenientemente calibrado, para circuitos de baja tensión con corrientes de elevada intensidad.

En los demás casos no expuestos, es preferible siempre el empleo de otros procedimientos para la protección contra sobreintensidades.

4 Características generales de los materiales aislantes

Conceptos generales

En general, se denomina *aislante eléctrico* a toda sustancia de tan baja conductividad eléctrica que el paso de la corriente a través de ella puede ser despreciado. La pequeña corriente que pasa a través del aislante se denomina *corriente de fuga* y la intensidad de ésta que puede ser tolerada, determina la clase de material que puede utilizarse como aislante. Los materiales aislantes se llaman también *dieléctricos* para indicar que se oponen al paso de la corriente eléctrica.

Por otra parte, un *medio dieléctrico* es un cuerpo en el que puede existir, en estado estático, un campo eléctrico. Por tanto, un dieléctrico no conduce la corriente eléctrica, pero en su interior puede existir un campo eléctrico que no sea nulo.

En Electrotecnia, los materiales aislantes o dieléctricos tienen gran importancia, ya que cumplen dos misiones fundamentales:

a) permiten aislar eléctricamente los conductores entre sí y estos mismos conductores respecto a tierra o a una masa metálica.
b) modifican, en gran proporción, el campo eléctrico que los atraviesa.

El vacío es el único dieléctrico perfecto ya que tiene conductancia nula. Los materiales aislantes normalmente empleados, son dieléctri-

cos imperfectos ya que, cuando están sometidos a una tensión eléctrica tienen las siguientes características:

1. Corrientes de desplazamiento.
2. Absorción de corriente.
3. Paso de corriente de conducción.

El circuito equivalente de un dieléctrico puede representarse en la forma indicada en la figura 4. El circuito dieléctrico consta de dos ramas en paralelo que representan, respectivamente, las componentes capacitiva y óhmica de la corriente. El condensador C representa la permitancia, y la resistencia R_1 la pérdida por absorción de corriente del dieléctrico; la resistencia R_2 representa la componente óhmica de la corriente de fuga. En un dieléctrico perfecto, R_1 sería nula y R_2 tendría un valor infinito. En la práctica, estas dos resistencias pueden combinarse en una sola resistencia, conectada en serie o en paralelo con C, siempre que se elija un valor adecuado. Los valores de C, R_1 y R_2 no son constantes, sino que dependen de la temperatura, la frecuencia y la tensión del dieléctrico.

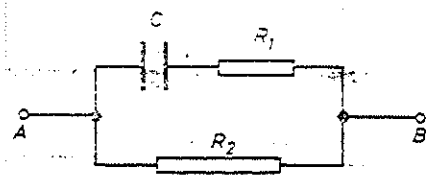


Fig. 4. — Circuito equivalente de un dieléctrico con pérdidas de energía y corrientes de fuga.

Propiedades generales de los materiales aislantes

Como ya sabemos, la finalidad de los materiales aislantes en las máquinas e instalaciones eléctricas, es asegurar un aislamiento eléctrico, seguro y suficiente entre los conductores y entre éstos y las partes metálicas del aparato o instalación. Para cumplir con éxito esta misión, es necesario que los materiales utilizados como aislantes, cumplan ciertas propiedades o características, que se pueden clasificar de la siguiente forma:

a) Propiedades eléctricas.
b) Propiedades mecánicas.
c) Propiedades físico-químicas.

Naturalmente, las propiedades eléctricas son las más interesantes. Pero no deben olvidarse las restantes: de nada serviría un material de excelentes propiedades eléctricas, si no pudiera resistir el esfuerzo mecánico o la temperatura, pongamos por ejemplos, a que debiera estar sometido por las características o necesidades de la instalación.

Podrían citarse entre 20 y 25 propiedades que deberían poseer los materiales aislantes para satisfacer, simultáneamente, todas las exigencias técnicas. Pero ninguno de los materiales aislantes conocidos poseen todas estas propiedades: cada material cumple solamente un determinado número de exigencias. Por esta razón y para cada aplicación específica, se dispone de gran número de materiales aislantes para que puedan elegirse los más adecuados, solos o combinados entre sí. Si hay varios materiales aislantes que cumplen los requisitos exigidos, el precio decide la elección.

Propiedades eléctricas de los materiales aislantes

Para elegir un material aislante deben tenerse en cuenta las siguientes propiedades eléctricas:

1. Resistencia de aislamiento.
2. Rigidez dieléctrica.
3. Constante dieléctrica.
4. Factor de pérdidas dieléctricas.
5. Factor de potencia.
6. Resistencia al arco.

A continuación, y en los parágrafos sucesivos, se definen y estudian estos conceptos.

Resistencia de aislamiento

Se denomina *resistencia de aislamiento* de un material aislante, a la resistencia que opone al paso de la corriente eléctrica, medida en la dirección en que deba asegurarse el aislamiento.

Como la corriente de fuga de un material aislante sigue dos caminos posibles, uno sobre la superficie del material y otro a través del cuerpo del material, habrá que distinguir entre *resistencia de aislamiento superficial* y *resistencia de aislamiento transversal o volumétrica*. Se sobreentiende que estos dos caminos de la corriente de fuga actúan en paralelo, y la pérdida óhmica total depende, en gran parte de las condiciones en la superficie del material aislante.

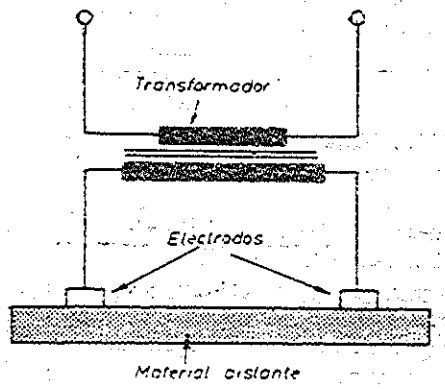


Fig. 5.—Concepto de resistencia de aislamiento superficial de un material aislante.

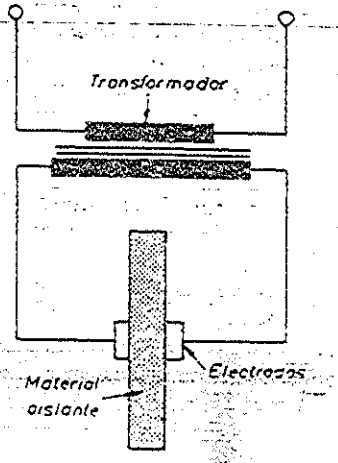


Fig. 6.—Concepto de resistencia de aislamiento transversal de un material aislante.

La *resistencia de aislamiento superficial* es la resistencia que ofrece la superficie del material al paso de la corriente, cuando se aplica una tensión entre dos zonas de dicha superficie (figura 5).

El valor de esta resistencia se refiere a la superficie comprendida entre las dos zonas sometidas a tensión, las cuales están en contacto con los electrodos, y suele medirse en megohmios por centímetro cuadrado (M Ω/cm^2). A esta magnitud se la denomina también *resistividad superficial.*

Si la superficie del material está sucia de grasa, ésta puede absorber polvo y, tal vez, algunos vapores metálicos. En estas condiciones, la pérdida de corriente es mucho mayor que si la superficie está limpia y lisa. Para lograr la máxima resistencia superficial, las piezas aislantes deben fabricarse lisas y pulidas, con objeto de reducir la posibilidad de acumulación de polvo y suciedad. Desde este punto de vista, tiene gran importancia el estado del molde utilizado para fabricar la pieza de material aislante.

La *resistencia de aislamiento transversal* corresponde a la resistencia que opone el material plástico a ser atravesado por la corriente, cuando se aplica una tensión entre dos de sus caras (figura 6).

También se denomina *resistividad transversal* o *volumétrica* y está expresada en ohmios - cm^2/cm (o bien, en megohmios - cm^2/cm). Recuérdese que la expresión general de la resistencia eléctrica es

$$R = \rho_v \frac{l}{s}$$

y, por tanto, que

$$\rho_v = R \frac{s}{l}$$

Si se toma como unidad de volumen, un cubo de 1 cm de arista, la expresión anterior toma la forma

$$\rho_v = R \frac{cm^2}{cm}$$

y si se expresa R en las correspondientes unidades de resistencia

$$\rho_v = \text{ohmios (o megohmios)} \frac{cm^2}{cm}$$

En un mismo material aislante, la resistividad transversal no es un valor constante, como suele ocurrir con los materiales conductores, sino que varía con la temperatura, la tensión aplicada, el tiempo, la humedad, el espesor del material, etc. Destacando los efectos debidos a la variación de temperatura, cuyo aumento produce una disminución de la resistividad transversal. Por consiguiente, la comprobación de la resistencia de aislamiento deberá efectuarse a la temperatura máxima que se prevé tendrá que soportar el material.

Naturalmente, cuanto mayor sea la resistividad de un material, tanto mejor resultará como aislante. Por consiguiente, al elegir un material como dieléctrico, debe procurarse que tenga una elevada resistividad, para reducir al mínimo las corrientes de fuga. No obstante, este dato no basta por sí solo para juzgar la calidad de un aislante, ya que deben considerarse también las restantes propiedades eléctricas, que reseñamos a continuación.

Rigidez dieléctrica

El aislante ideal no se conoce todavía; en todos los casos, cuando se aplica una tensión entre las dos caras de una pieza aislante (véase la figura 6), esta pieza es atravesada por una pequeña *corriente de fuga.* Con ello, el material aislante se calienta localmente y el calentamiento permite el paso de más corriente (ya que disminuye la resistividad transversal, como hemos dicho anteriormente). Este efecto es acumulativo y, si la tensión alcanza un valor suficientemente elevado, puede producirse la perforación del aislamiento, con las consiguientes

perturbaciones o averías si se trata de un material en servicio. El fallo se manifiesta por una superficie quemada o por una perforación con volatilización completa del material.

Se denomina *rigidez dieléctrica* a la propiedad de un material aislante de oponerse a ser perforado por la corriente eléctrica. Su valor se expresa por la relación entre la tensión máxima que puede apreciarse sin que el aislamiento se perfore (llamada *tensión de perforación*) y el espesor de la pieza aislante. Suele expresarse en kilovoltios por milímetro (kV/mm).

Debe tenerse siempre en cuenta el espesor del material en que se ha efectuado el ensayo de determinación de la rigidez dieléctrica, ya que ésta no es constante, sino que varía con el espesor del material. Es muy frecuente utilizar erróneamente el concepto de rigidez dieléctrica, por no prestar la debida atención a este particular. Si, por ejemplo, una lámina de un material dado de 2 mm de espesor se perfora a 20 kV, una lámina del mismo material y de 1 mm de espesor, no se perforará a 10 kV, sino antes. O sea, que el valor de la tensión de perforación no es proporcional al espesor de la lámina; por consiguiente, la rigidez dieléctrica es variable.

Al aumentar la temperatura, la disminución de la rigidez dieléctrica es aún más acusada. Otros factores, como la humedad, el tiempo, etc., influyen también en el valor de la rigidez, lo que hace difícil establecer una cifra que lo refleje con exactitud. Por consiguiente, resulta necesario, en cada caso, expresar las condiciones en que se ha obtenido este dato.

Naturalmente, cuanto mayor sea la tensión de perforación de un material, más difícilmente se producirá la perforación en servicio. Por lo tanto, interesa utilizar los materiales de más elevada rigidez dieléctrica, tanto más cuanto más elevada sea la tensión a que deban trabajar.

Hasta un cierto valor de la temperatura denominado *temperatura límite*, la rigidez dieléctrica es independiente de la temperatura, del espesor del aislante y de la duración y la forma de la tensión eléctrica aplicada (figura 7); por encima de la temperatura límite, ésta influye mucho en el valor de la rigidez dieléctrica, que tal como puede apreciarse en la figura, disminuye rápidamente si aumenta la temperatura. En general, esta temperatura límite está comprendida entre −50° C y +50° C, aunque en la porcelana se encuentra hacia los 90° C y en algunos materiales cerámicos sube hasta 500° C. El valor de la temperatura límite es de importancia esencial para la elección de un material aislante apropiado, ya que es un índice de las temperaturas a que puede trabajar dicho material con plena garantía.

Relacionado con el concepto de rigidez dieléctrica está el de *perforación*. Se habla de *perforación eléctrica* de un aislante, cuando la descarga disruptiva se produce por debajo del valor de la temperatura

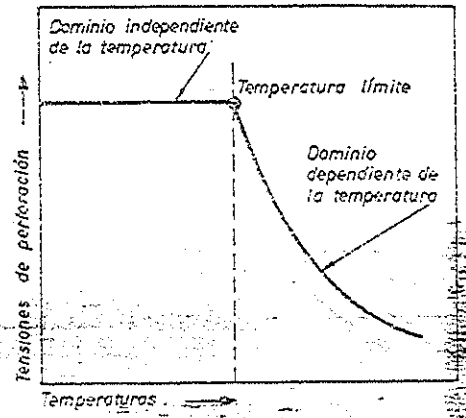


Fig. 7.—Variación de la tensión de perforación de un material aislante, en función de la temperatura.

límite ya que, en este caso, la perforación se debe, exclusivamente, a la tensión aplicada. Cuando la perforación se produce por encima de la temperatura límite, se denomina *perforación electrotérmica* que se presenta cuando la tensión aplicada, para una temperatura inicial dada, es insuficiente para provocar la perforación inmediatamente, pero la promueve a causa del calentamiento interno debido a las pérdidas dieléctricas, de las que se hablará en un próximo parágrafo.

Constante dieléctrica

El empleo de los materiales aislantes en la construcción de condensadores y los efectos capacitivos existentes en los cables de transporte de energía, hace necesario conocer las constantes dieléctricas de los materiales aislantes utilizados en estas aplicaciones.

Recordemos que se llama *constante dieléctrica* de un material aislante, a la relación entre la capacidad de un condensador que emplea como dieléctrico el material considerado, y la capacidad del mismo condensador empleando como dieléctrico el vacío.

De la conocida fórmula de la capacidad de un condensador:

$$C = 0{,}8859 \frac{S\ (n-1)}{10^7\ d}\ \varepsilon \ \textit{microfaradios}$$

C = capacidad en microfaradios
S = superficie total de una placa (dos caras), en cm²
n = número de placas
d = distancia entre placas o espesor del dieléctrico, en cm
ε = constante dieléctrica

Se deduce que, cuanto mayor sea la constante dieléctrica, mayor será la capacidad del condensador. Y también que será mayor la capacidad cuanto más delgado sea el aislamiento entre placas, o sea cuanto menor sea *d*. No obstante, hay un límite mínimo para este espesor, ya que al mismo tiempo disminuye la rigidez dieléctrica.

Los materiales aislantes que dan mejores resultados como aislamiento entre placas de condensadores, son las láminas de elevada rigidez dieléctrica. Pero a igualdad de rigidez dieléctrica, el material que debe elegirse es el que posea la constante dieléctrica más elevada, con objeto, de conseguir la máxima capacidad con el mínimo volumen.

En otras ocasiones ocurre precisamente lo contrario. Por ejemplo, en un cable eléctrico constituido por conductores correspondientes a distinta polaridad o a distinta fase y separados por una capa aislante, para disminuir el efecto capacitivo que se produce, y que no es conveniente en la mayoría de los casos, se emplea un aislamiento más grueso y con una constante dieléctrica lo menor posible.

Factor de pérdidas dieléctricas

Se entiende por *pérdidas dieléctricas*, la potencia eléctrica perdida a través de los aislantes. Estas pérdidas tienen valores reducidos por lo que, generalmente, pueden despreciarse en aplicaciones industriales.

La corriente de fuga, al atravesar el material aislante, lo calienta. El *factor de pérdidas dieléctricas* constituye un criterio para medir la pérdida de potencia por calentamiento de los aislamientos. También se considera una medida de la capacidad de generación de calor por unidad de volumen del material aislante.

Recuérdese que en los conductores, máquinas y aparatos eléctricos, el caso más favorable de aprovechamiento de la potencia disponible

$$P = U\ I\ \cos\varphi$$

se obtiene cuando

$$\cos\varphi = 1$$

o, lo que es lo mismo, cuando

$$\varphi = 0$$

es decir, cuando la tensión y la intensidad de corriente están en fase.

En el caso de un aislante se comprende que, por idéntica razón, el caso más favorable será aquél en que la potencia perdida a través del aislamiento sea nula, es decir, cuando

$$P = U\ I\ \cos\varphi = 0$$

y para ello, es preciso que

$$\cos\varphi = 0$$

es decir, que

$$\varphi = 1$$

tal como se expresa en la figura 8. Este sería el caso del aislamiento ideal. Pero en la práctica siempre se producen pérdidas cuyo valor, generalmente muy reducido, es proporcional a la tangente del ángulo δ, complementario del ángulo φ de desfase (figura 9).

El ángulo δ se denomina *ángulo de pérdidas*. Obsérvese en la citada figura 9 que el valor de tag δ es exactamente igual al valor de cos φ, es decir, del factor de potencia.

Como la energía almacenada en un dieléctrico es proporcional a su constante dieléctrica ε, las pérdidas dieléctricas en este material serán proporcionales al producto

$$\varepsilon \cdot tg\ \delta$$

que se denomina *factor de pérdidas dieléctricas*.

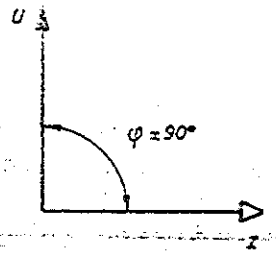


Fig. 8.—Desfase de 90° entre la corriente de fuga y la tensión de un dieléctrico.

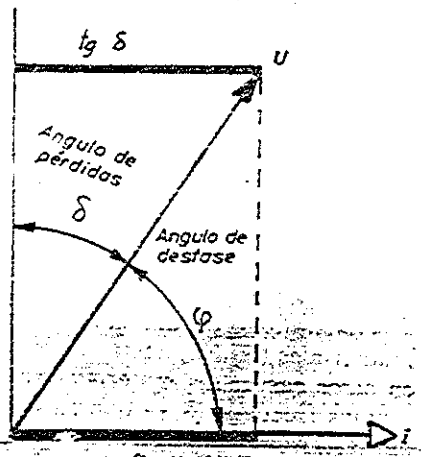


Fig. 9.—Concepto de ángulo de pérdidas de un dieléctrico.

Se comprende fácilmente que, para que un material plástico sea un buen aislante, interesa que las pérdidas dieléctricas sean mínimas. Por lo tanto, es preciso que el valor de tg δ sea lo más pequeño posible.

Conociendo el valor del ángulo de pérdidas δ, pueden calcularse fácilmente las pérdidas dieléctricas, aplicando la fórmula

$$P = 2\,\pi\,f\,C\,U^2\,tg\,\delta \qquad vatios$$

P = pérdidas dieléctricas, en vatios
f = frecuencia del circuito, en Hz
C = capacidad, en faradios
U = tensión, en voltios.

o, también, por la fórmula

$$P = U\,I\,tg\,\delta$$

Por lo tanto, y de acuerdo con lo dicho, es posible clasificar los materiales aislantes por su ángulo de pérdidas. Este varía con la temperatura, la tensión aplicada, etc., pero, muy especialmente con la frecuencia: en muchos materiales aislantes es inversamente proporcional, en otros sucede lo contrario y en algunos, el factor de pérdidas dieléctrico permanece prácticamente constante en una amplia gama de frecuencias.

Como el factor de pérdidas dieléctricas es determinante para el calentamiento del material y su posible perforación electrotérmica, un material será tanto mejor aislante cuanto menor sea su factor de pérdidas dieléctricas. Y teniendo en cuenta la posible variación con la frecuencia, a la que hemos aludido en el párrafo anterior, en lo que se refiere a la posible aplicación de un material aislante en el campo de las altas frecuencias (radio, televisión, aplicaciones electrónicas, etcétera), deberá tenerse en cuenta el valor que adquiere el factor de pérdidas en la gama de frecuencias en que este material deba trabajar, ya que si este factor resulta muy elevado, el material es inadecuado.

En los sucesivos capítulos, en que se estudian los diferentes materiales aislantes, se podrá comprobar que existen materiales aptos para funcionamiento en una gama de frecuencias que comprende desde los industriales (50 Hz) hasta las de radiofrecuencia (del orden de 1 MHz); en otros casos, los materiales sólo son aptos para su funcionamiento a bajas frecuencias ya que su factor de pérdidas se hace muy grande a altas frecuencias; otros materiales, finalmente, tienen un factor de pérdidas muy reducido a alta frecuencia y elevado a baja frecuencia, por lo que sus aplicaciones deben limitarse al campo de la alta frecuencia.

Factor de potencia

Ya nos hemos referido al *factor de potencia* en el parágrafo precedente, como el coseno del ángulo de desfase entre la tensión y la componente de la corriente que atraviesa el aislante.

Muchas veces, se utiliza este concepto en lugar del ángulo de pérdidas, cuando se quiere expresar la calidad de un aislante, en lo que se refiere a sus pérdidas dieléctricas.

Si se conocen las pérdidas dieléctricas de un material aislante, se puede calcular su factor de potencia, mediante la fórmula

$$\cos\varphi = \frac{P}{U\,I}$$

Como se ha indicado anteriormente, el aislante ideal sería aquél en que

$$\cos\varphi = 0$$

con lo que no habría circulación de corriente a través del aislante. Por consiguiente, se puede decir que *un material es tanto mejor aislante cuanto más bajo sea su factor de potencia.*

Resistencia al arco

Algunos elementos que emplean materiales aislantes, por su función específica (interruptores, conmutadores, tomas de corriente, etc.) están frecuentemente sometidos a la acción de arcos eléctricos, que pueden llegar a inutilizar el aislamiento.

La *resistencia al arco* se mide por el tiempo que un material aislante es capaz de resistir los efectos destructivos de un arco antes de inutilizarse por haber formado el arco un camino carbonizado, conductor, sobre la superficie del aislante. Este tiempo depende, naturalmente, de la tensión aplicada y de la corriente del arco.

No todos los materiales aislantes se carbonizan pero sí casi todos pueden agrietarse por el intenso calor que acompaña al arco. No obstante, algunos materiales resultan mejores que otros en lo que respecta a la resistencia al arco, ya que las condiciones en que éste se produce, varían considerablemente. Debe seleccionarse cuidadosamente el material más idóneo para cada caso, de acuerdo con las recomendaciones de las firmas fabricantes.

Para disminuir la acción del arco, se incorporan a los aparatos eléctricos diversos dispositivos tales como cámaras apagachispas, bobinas de soplado, etc.

Ensayo de las propiedades eléctricas de los materiales aislantes

(Preguntar si entra)

Para poder juzgar las propiedades eléctricas que tienen los materiales aislantes, es necesario someter estos materiales a una serie de ensayos. En el presente parágrafo, se describirán algunos de estos ensayos, los que pueden realizarse con los medios y aparatos más sencillos y más fácilmente disponibles, pero que proporcionan suficientes datos sobre las propiedades eléctricas del material ensayado. No es posible, dada la extensión de esta obra, el estudio de todos los procedimientos de ensayo, los cuales se describen en obras especializadas.

Probetas y electrodos. Los ensayos eléctricos se realizan sobre trozos del material que se quiere probar, de forma y dimensiones determinadas, a los que se da el nombre de *probetas*.

Como ya se ha dicho en parágrafos anteriores, las propiedades eléctricas de los aislantes están considerablemente influidas por el valor de la tensión aplicada, la humedad, la temperatura, etc. Por este motivo, antes de comenzar un ensayo es conveniente, y así lo prescriben las normas oficiales, someter las probetas a determinados tratamientos previos, con objeto de regularizar las condiciones iniciales y reducir al mínimo la influencia de aquéllas en el resultado obtenido.

En general, los tratamientos previos que deben aplicarse a las probetas antes del ensayo, son los siguientes:

Térmicos:

Calentamiento de las probetas a diferentes temperaturas, según el destino del material.

Mecánicos:

En que se someten las probetas a esfuerzos de tracción, flexión, compresión, doblado, torsión, etc.

Humedad:

Puede mantenerse el aislante a temperatura ambiente y con una humedad relativa no superior a 95 %. O a temperatura ambiente y sumergido totalmente en agua. O a temperaturas superiores a la ambiente y en las condiciones de humedad expresadas anteriormente.

Químicos:

Se somete el material aislante a la acción de ciertos reactivos químicos durante tiempos variables (según el reactivo y el material a ensayar, desde una hora o varios días).

Las dimensiones de las probetas están normalizadas en las Normas UNE.

Los *electrodos* son las piezas conductoras que se conectan, a una fuente de energía eléctrica (generador o transformador) y que se ponen en contacto con la probeta de material aislante para someterla a la tensión de prueba. Como es natural, un juego de electrodos está constituido por dos piezas: el electrodo de entrada de corriente y el electrodo de salida de corriente.

Dada la importancia de los electrodos para la obtención de resultados satisfactorios, es conveniente en cada caso utilizar el tipo de electrodo más apropiado, cuya forma y dimensiones están prescritas en la Norma UNE 53030.

El material de constitución de los electrodos ha de ser siempre cobre o latón pulido.

Ensayos de resistencia de aislamiento. Recuérdese de un parágrafo anterior, que diferenciábamos la resistencia de aislamiento transversal, cuando la corriente atraviesa el material, y la resistencia de aislamiento superficial, cuando la corriente circula solamente por la superficie del dieléctrico.

Para los ensayos de resistencia de aislamiento transversal, se recomienda el empleo de electrodos de mercurio, como los que se describirán seguidamente, que ofrecen la ventaja de poder adaptarse a la forma de la superficie de la probeta a ensayar.

Un juego de electrodos de mercurio (figura 10) está constituido de la siguiente forma: un electrodo inferior, constituido por mercurio líquido contenido en una vasija en forma de plato, como se representa en la citada figura 10. Sobre el mercurio, en que flota, se coloca la probeta del material que se quiere ensayar y, sobre ésta, el otro electrodo, también de mercurio, que se forma colocando sobre la probeta un anillo aislante de 62 mm de diámetro interior y paredes bastantes gruesas, que contiene mercurio líquido; además, se coloca otro anillo

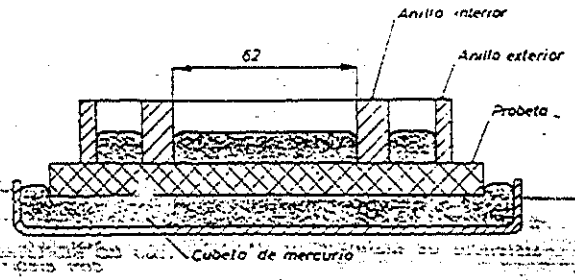


Fig. 10. — Electrodos de mercurio para ensayo de resistencia de aislamiento transversal.

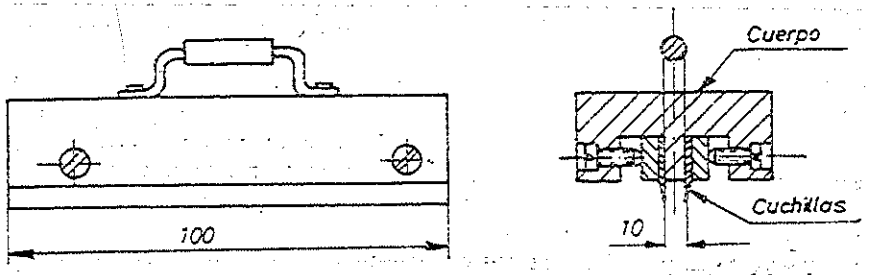


Fig. 11.— Electrodos de cuchilla para ensayos de resistencia de aislamiento superficial.

y el espacio entre ambos se llena también de mercurio, que queda así aislado del disco de mercurio central.

En lugar de mercurio, puede emplearse también una capa de pintura conductora, o pueden metalizarse las dos superficies de la probeta, cuidando en ambos casos que la película conductora que actúa de electrodo, esté perfectamente aplicada al aislante, haciendo contacto con éste en toda su superficie.

Para los ensayos de resistencia de aislamiento superficial, pueden emplearse los mismos electrodos que se acaban de describir, aunque es más corriente el uso de otro tipo de electrodos, constituidos por dos cuchillas rectas, de 10 cm de longitud cada una y separadas paralelamente 1 cm entre sí (figura 11).

Los ensayos de determinación de la resistencia de aislamiento transversal se realizan según el esquema de la figura 12, empleando una

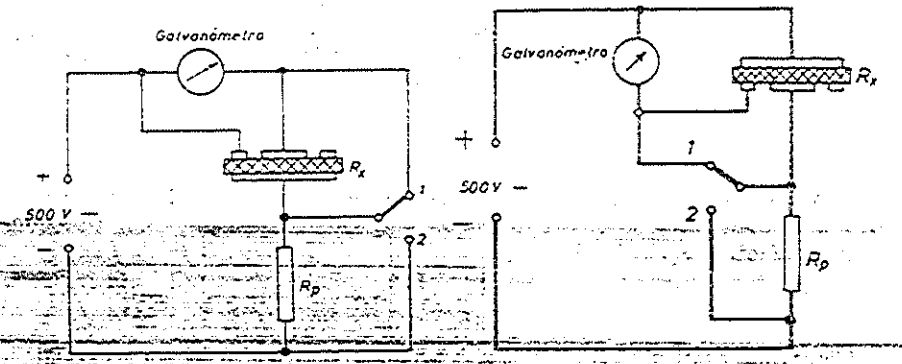


Fig. 12.— Circuito de medida de la resistencia de aislamiento transversal.

Fig. 13.— Circuito de medida de la resistencia de aislamiento superficial, con electrodos de mercurio.

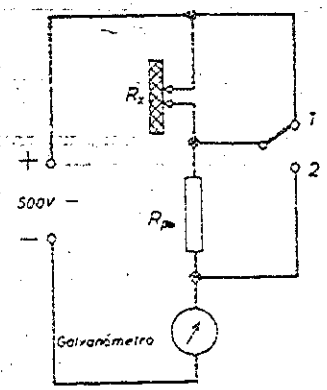


Fig. 14.— Circuito de medida de la resistencia de aislamiento superficial, con electrodos de cuchilla.

tensión continua de 500 V. Primeramente, se conecta el conmutador en la posición 1 y, a continuación, en la posición 2. El método consiste en comparar la corriente que atraviesa la resistencia de prueba R_p, de valor conocido (posición 1), y la que circula por la probeta (posición 2) cuya resistencia R_x es la que se trata de averiguar.

La resistencia de aislamiento superficial se determina de forma similar. Si se utilizan electrodos de mercurio, se emplea el esquema de la figura 13 y, si se efectúa la prueba con electrodos de cuchillas, se sigue el esquema representado en la figura 14, que es el más utilizado en este tipo de ensayos.

Como ya se dijo anteriormente, es característico de los materiales aislantes que su resistencia disminuye al aumentar la temperatura. Por consiguiente, la resistencia de aislamiento debe comprobarse a la temperatura máxima que se espera tenga que soportar el material, para saber si su valor es o no aceptable.

Como ejemplo, se puede decir que la resistencia de aislamiento que, según las prescripciones reglamentarias, deben tener los conductores de uso corriente, en baja tensión, va desde 600 hasta 300 M Ω, según el tipo de conductor utilizado. Y que en las máquinas eléctricas se admite como buena, una resistencia de aislamiento cuyo valor en megohmios sea igual al cociente

$$\frac{\text{Tensión nominal en V}}{\text{Potencia nominal en kW} + 1\,000}$$

estando la máquina en caliente, es decir, en pleno funcionamiento, en frío, con la máquina parada, se obtienen valores hasta diez veces superiores al valor de la resistencia en caliente.

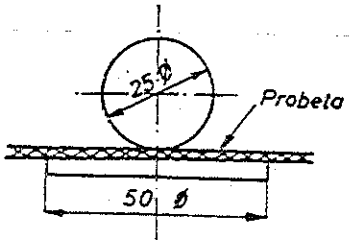


Fig. 15. — Electrodos de bola y disco para ensayos de rigidez dieléctrica.

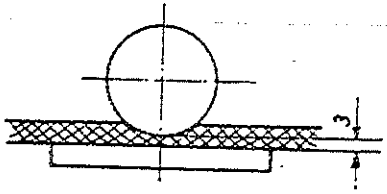


Fig. 16. — Electrodos de bola y disco para ensayos de rigidez dieléctrica (caso en que el grueso del material es grande).

Ensayos de rigidez dieléctrica. En los ensayos de determinación de la rigidez dieléctrica, pueden utilizarse tres tipos de juegos de electrodos, que se detallan a continuación.

El primer tipo (figura 15), consiste en un electrodo en forma de esfera, de 25 mm de diámetro y otro electrodo en forma de disco, cuyo diámetro es de 50 mm. Entre ambos electrodos se coloca la probeta del material que se ha de ensayar, tal como se representa en la citada figura 15. Si el espesor de la probeta es superior a 3 mm se rebajará hasta dicha medida, mecanizando en una de sus caras un casquete esférico en el que se incrustará el electrodo de la esfera, según se expresa en la figura 16. Tanto en este último caso, como si el espesor de la probeta es inferior a 3 mm, se cuidará de que el centro de la esfera quede alineado con el eje del disco, para que la trayectoria de la corriente eléctrica sea perpendicular a las caras de la probeta. Este tipo de electrodos se emplea para probetas que tengan, por lo menos, una cara plana.

Otro tipo de juego de electrodos es el representado en la figura 17. Consiste en dos electrodos de forma esférica, de 25 mm de diámetro cada uno. Se utiliza para ensayos en probetas de caras curvas, en las que no es posible utilizar el electrodo de disco descrito anteriormente.

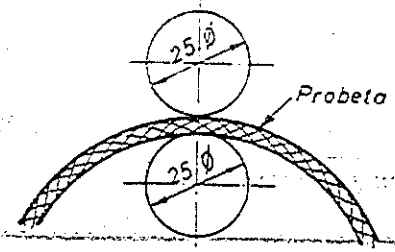


Fig. 17. — Electrodos de bolas para ensayos de rigidez dieléctrica.

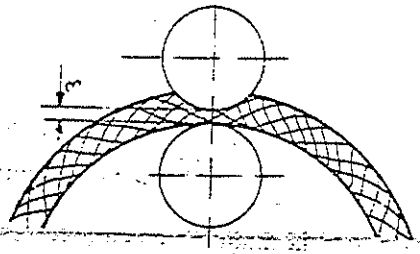


Fig. 18. — Electrodos de bolas para ensayos de rigidez dieléctrica (caso en que el grueso del material es grande).

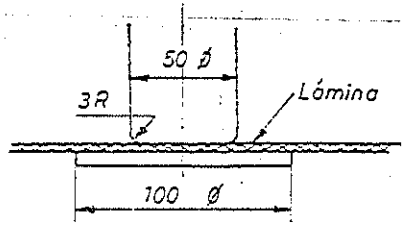


Fig. 19. — Electrodos de cilindro y disco para ensayos de rigidez dieléctrica.

También ahora es preciso rebajar el espesor de la probeta a 3 mm en caso de ser superior a esta medida (figura 18).

También pueden realizarse los ensayos de rigidez dieléctrica empleando un juego de electrodos constituido por un disco de 100 m de diámetro (figura 19) y otro en forma de cilindro de 50 mm de diámetro y con los bordes redondeados con un radio de 3 mm. Este tipo se utiliza para determinar la rigidez dieléctrica en materiales en hojas o láminas y espesores inferiores a 3 mm.

Finalmente, en otros casos especiales, por ejemplo para ensayos de materiales suministrados en formas determinadas (tubos, cilindros, etcétera) se utilizan electrodos de forma especial, adaptables a las mismas.

Se aconseja que para los ensayos de rigidez dieléctrica se sumerjan completamente la probeta y los electrodos en aceite mineral aislante, si el material que se debe ensayar no es atacado por el aceite. En caso de que la probeta sea atacada por el aceite, el ensayo se efectuará en el aire, pero procurando que su humedad relativa esté comprendida entre 60 % y 80 % para estos ensayos al aire, la temperatura será de unos 20° C. Los ensayos en aceite pueden hacerse en frío, a 20° C, o en caliente, a unos 60° C. En este último caso, se debe mantener constante la temperatura durante todo el ensayo, y no puede comenzarse éste hasta unos 30 minutos después de sumergir la probeta en el aceite.

Existen dos procedimientos de ensayo: uno, de aplicación continua y progresiva de la tensión y un segundo ensayo escalonado, llamado "de minuto".

En el primero, se conectan los electrodos, entre los que se ha colocado la probeta, a los terminales de un transformador y, por medio de un dispositivo adecuado, va incrementándose progresivamente la tensión, hasta que se produzca la perforación de la probeta. La variación de tensión puede conseguirse por cualquiera de los procedimientos representados en las figuras 20 y 21.

En la figura 20 se ha supuesto un transformador con varias tomas en el secundario. La instalación va provista de una lámpara de señali-

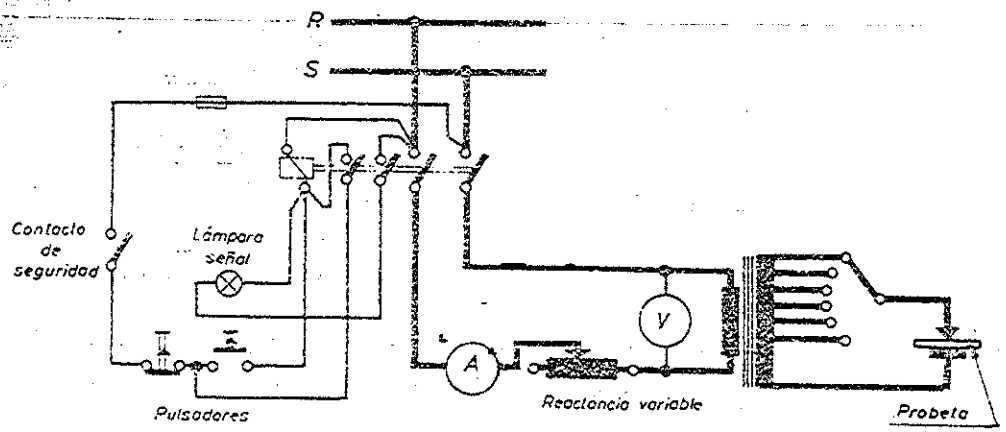


Fig. 20.—Circuito de medida de la rigidez dieléctrica en un material aislante, con variación de la tensión por medio de un transformador de tomas.

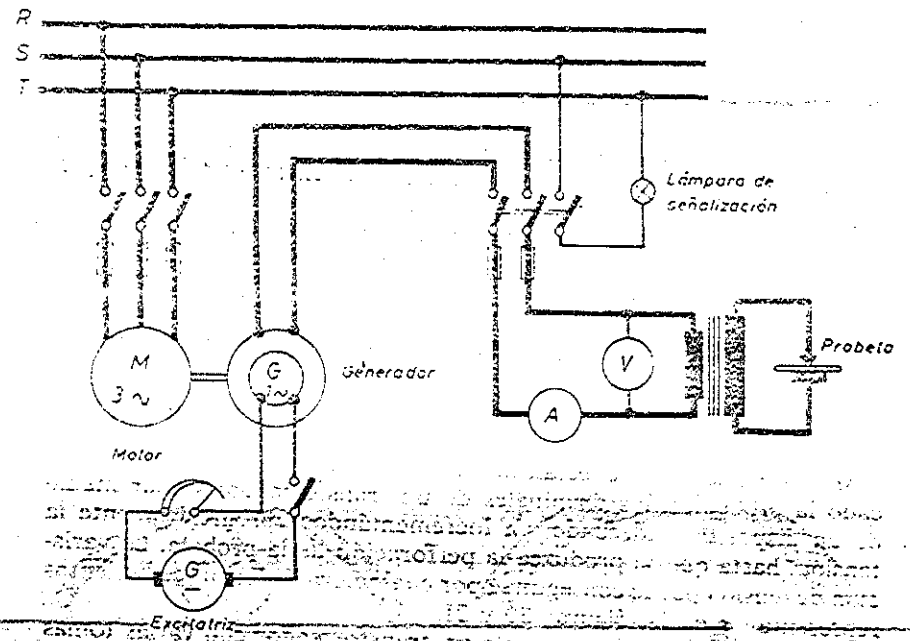


Fig. 21.—Circuito de medida de la rigidez dieléctrica de un material aislante, con variación de la tensión de un alternador.

zación, que se enciende al conectar el transformador a la red, y de un contacto de seguridad que impide que el contactor se cierre en caso de que no se cumpla alguna determinada medida de protección.

En la figura 21, se regula la tensión de un alternador de prueba, mediante el regulador del circuito de excitación. Obsérvese que esta instalación también está provista de la correspondiente lámpara de señalización y del contacto de seguridad al que anteriormente hemos aludido.

En el ensayo escalonado o "de minuto", se comienza por aplicar una tensión inicial, cuyo valor sea, aproximadamente, la mitad de la tensión de perforación obtenida en el ensayo anterior, manteniéndose ésta durante un minuto. Al cabo de este tiempo, se aumenta el valor de la tensión en 1/10 aproximadamente, del mismo valor de tensión de perforación del ensayo anterior. Se mantiene este nuevo valor durante un minuto más y, si el material resiste, se resuelve a incrementar la tensión y a mantenerla durante el mismo período de tiempo. Y así sucesivamente hasta que se produce la ruptura.

Como tensión de perforación debe tomarse el valor máximo de la tensión que produce la ruptura. Recuérdese, a este respecto, que en corriente alterna, la tensión nominal no es la tensión máxima a la que realmente está sometido el aislante. La tensión nominal corresponde, en este caso, a la tensión eficaz y, para obtener el valor de la tensión máxima que deberá soportar el aislante de un aparato conectado a 50 Hz, debe multiplicarse el valor nominal por 1,41. Por ejemplo, la tensión máxima a que está sometido un circuito cuya tensión nominal es 220 V, vale

$$U_{max} = 1{,}41 \times 220 = 310 \text{ V}$$

y, por consiguiente, los aislantes correspondientes deben preverse para trabajar a 310 V y no a 220 V.

Interesa advertir que, muchas veces, las piezas moldeadas por compresión y por inyección presentan zonas en las que la rigidez dieléctrica es muy inferior al valor normal en las otras partes de la pieza alcanzando, en algunos casos, hasta una tercera parte de este valor. Como quiera que un aislante es tan fuerte como su punto más débil, interesa someter estas piezas a riguroso control antes de aceptarlas para aislamiento de aparatos eléctricos.

Para poder poner en funcionamiento cualquier aparato eléctrico, su aislamiento debe resistir las tensiones de prueba prescritas reglamentariamente. Como ejemplo, digamos que para algunos cables, la rigidez dieléctrica del aislamiento debe ser suficiente para resistir, sin pérdida de sus cualidades aislantes y durante 15 minutos, una tensión

alterna, de una frecuencia comprendida entre 20 y 100 Hz y cuyo valor eficaz sea

$$24\ U + 1\,000\ V$$

siendo U la tensión de servicio, con un mínimo total de 1 500 V.

Si el aislamiento resiste, en estas condiciones, la tensión establecida reglamentariamente, existe un amplio factor de seguridad durante la vida del producto.

Ensayos de pérdidas dieléctricas. Se dijo en un parágrafo anterior que las pérdidas dieléctricas están expresadas por el valor de la tangente del ángulo de pérdidas δ, complementario del ángulo de fase φ. Dado el reducido valor del ángulo δ, no superior a un grado en los buenos aislantes, se comprende que su determinación sea delicada y difícil.

Como, por otra parte, el factor de pérdidas dieléctricas suele ser despreciable en aplicaciones industriales, no creemos oportuno entrar en detalle sobre los diferentes procedimientos que existen para su determinación, ya que su estudio alargaría innecesariamente nuestro tema.

Diremos ,tan sólo que suelen emplearse métodos análogos al puente de Wheatstone, por comparación entre condensadores de características conocidas y un condensador cuyo dieléctrico es el material a probar. Uno de los procedimientos más utilizados es el *puente de Schering*, cuyo esquema de conexiones se ha representado en la figura 22.

Ensayos de la constante dieléctrica. Como ya sabemos la *constante dieléctrica* de un aislante es la relación entre las capacidades de un mismo condensador según tenga por dieléctrico el material considerado o el aire.

Por consiguiente, el procedimiento a seguir para la determinación de la constante dieléctrica es muy sencillo. Se toma un condensador de placas con dieléctrico de aire y se mide su capacidad. Luego, se coloca entre las placas, el aislante cuya constante dieléctrica interesa conocer, cuidando de conservar las mismas dimensiones y se vuelve a medir la capacidad del condensador. La relación de capacidades

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}$$

en la que C corresponde al dieléctrico ensayado y C_0 al aire, nos da otra constante dieléctrica cuyo valor se pretende averiguar.

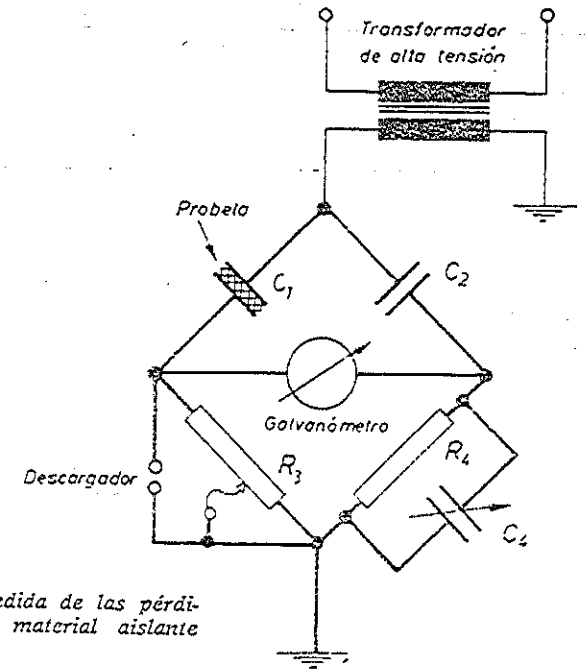


Fig. 22.—Circuito de medida de las pérdidas dieléctricas de un material aislante (Puente de Schering).

Para calcular la capacidad, recuérdese que

$$C = \frac{Q}{V}$$

Q = cantidad de electricidad, en culombios
V = tensión entre armaduras, en voltios

y que

$$Q = I\ t$$

I = intensidad de carga o de descarga, en amperios
t = tiempo de carga o de descarga, respectivamente, en segundos

Ensayos de la resistencia al arco. Dado el relativo interés de este tipo de ensayos y con objeto de no extendernos demasiado en nuestra explicación, invitamos al lector interesado a consultar la Norma UNE

53040 "Determinación de la resistencia a la formación de una huella conductora por arco de baja tensión e intensidad media en los materiales aislantes sólidos", y también la Norma UNE 53082 "Resistencia a la formación de una huella conductora por chispas, a alta tensión e intensidad débil".

Propiedades mecánicas de los materiales aislantes

Las principales propiedades mecánicas que deben considerarse en los materiales aislantes, son las siguientes:

a) *Resistencia a la tracción.*
b) *Resistencia a la compresión.*
c) *Resistencia a la flexión.*
d) *Resistencia a la cortadura.*
e) *Resistencia al choque.*
f) *Dureza.*
g) *Límite elástico.*
h) *Maquinabilidad.*

que vamos a definir a continuación.

Resistencia a la tracción. Es la propiedad de resistir esfuerzos mecánicos que tienden a estirar o a alargar un material. La resistencia a la tracción de la mayoría de los materiales aislantes es relativamente baja y está comprendida entre 140 y 550 kg/cm². No obstante, en algunos plásticos extraídos se han obtenido cifras del orden de 4.200 kg/cm². El sistema de moldeo tiene una importante influencia en el valor de la resistencia a la tracción, así como la temperatura y la humedad.

Resistencia a la compresión. Es la propiedad del material que le permite resistir esfuerzos mecánicos que tiendan a acortarlo o comprimirlo. Los valores de resistencia a la compresión, por lo general, son más elevados que los de resistencia a la tracción, o sea que se necesitará más esfuerzo para romper un material aislante por compresión que por tracción. Según el tipo de material el valor de la resistencia a la compresión está comprendido entre 500 y 2.500 kg/cm². Lo mismo que en el caso anterior, la temperatura influye notablemente en la resistencia a la compresión, que disminuye con el aumento de aquélla.

Resistencia a la flexión. Es la capacidad del material para resistir esfuerzos que tiendan a doblarlo. De la misma forma que en las anteriores propiedades, la resistencia a la flexión está influenciada por la humedad y por la temperatura.

Resistencia a la cortadura. Es la propiedad, por la cual un material resiste esfuerzos mecánicos que tienden a cortarlo, haciendo deslizar una parte del material sobre la otra.

Resistencia al choque. Es la capacidad del material para resistir el impacto de un choque o golpe.

Dureza. Es una característica muy directamente relacionada con la resistencia a la compresión y puede definirse como la resistencia que opone un material a ser penetrado por una bola o un punzón.

Límite elástico. Todo material, por muy buenas que sean sus propiedades mecánicas, pueden resistir los esfuerzos que acabamos de enumerar solamente hasta cierto límite, por encima del cual, el material se deforma, sin volver a recuperar su forma primitiva. Se denomina *límite elástico* de un material, al esfuerzo máximo que puede aplicarse al mismo, sin que experimente deformaciones permanentes. Por debajo de este valor máximo aplicable, existen otros que también producen la deformación del material pero éste, una vez cesa el esfuerzo, recupera su forma primitiva. A estas deformaciones se les llama *deformaciones elásticas.*

Maquinabilidad. Se denomina *maquinabilidad* de un material, a la facilidad con que puede ser mecanizado con herramientas cortantes. Algunos materiales aislantes presentan una extraordinaria facilidad para el mecanizado, mientras que otros son muy difíciles de trabajar.

El mecanizado de piezas de materiales aislantes en máquinas herramientas se hace necesario en muchas ocasiones como, por ejemplo, cuando la precisión de las formas o las tolerancias de fabricación, muy estrechas, no pueden obtenerse en el moldeo y, también, cuando han de fabricarse piezas que se encuentran comercialmente en forma de planchas, tubos, perfiles, etc.

Ha de tenerse en cuenta que, como los materiales aislantes, son malos conductores del calor, casi la totalidad del calor generado en el filo de la herramienta ha de ser evacuado por la propia herramienta, en lugar de serlo también por la pieza, como ocurre con los metales. Por lo tanto, puede ocurrir que la herramienta se caliente excesivamente y es fácil que, en este caso, se destemple.

En las operaciones de mecanizado de piezas de material aislante ha de ponerse gran cuidado en evitar grietas u otros daños que pudieran mermar las cualidades dieléctricas del material.

(Preguntar se entra)

Ensayo de las propiedades mecánicas de los materiales aislantes

Para determinar o comprobar las características mecánicas que se acaban de exponer, los materiales aislantes han de ser sometidos a los correspondientes ensayos. Por consiguiente, los ensayos mecánicos tienen por objeto comprobar la resistencia de los aislantes a que puedan estar sometidos en servicio, para procurar que tales esfuerzos no excedan de su capacidad de resistencia mecánica. A continuación se estudian, de forma resumida, los más importantes ensayos mecánicos a que se someten estos materiales.

Ensayo de resistencia a la tracción. Este ensayo se realiza para determinar la resistencia y el límite elástico a la tracción, así como también el *alargamiento específico*, que vamos a definir seguidamente.

El ensayo se realiza con probetas del material a ensayar, cuya forma y dimensiones se indican en la figura 23. Uno de los extremos de la probeta se sujeta fuertemente y en el otro se aplica una fuerza de tracción hasta que se rompe la probeta. Esta operación se realiza en máquinas especiales, similares a las utilizadas para efectuar los ensayos a la tracción de los metales (figura 24).

El esfuerzo de tracción se expresa por la relación entre la fuerza aplicada F, expresada en kg, y la sección s de la probeta, expresada en cm², es decir, por

$$\sigma = \frac{F}{s} \quad kg/cm^2$$

El esfuerzo σ irá aumentando a medida que aumente también F y la probeta, antes de romperse se alargará, de manera que, si sobre ella se han marcado previamente dos trazos transversales a una distancia l, en el instante de producirse la rotura, esta distancia será l_1. La diferencia $l_1 - l$ entre la distancia final y la inicial se llama alargamiento.

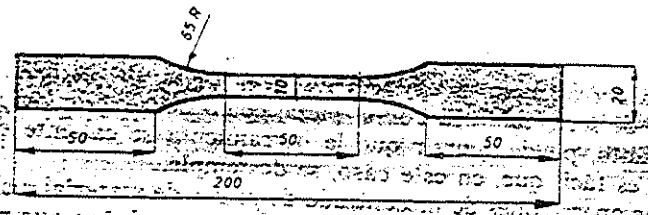


Fig. 23.—Probeta para ensayo de resistencia a la tracción de un material aislante.

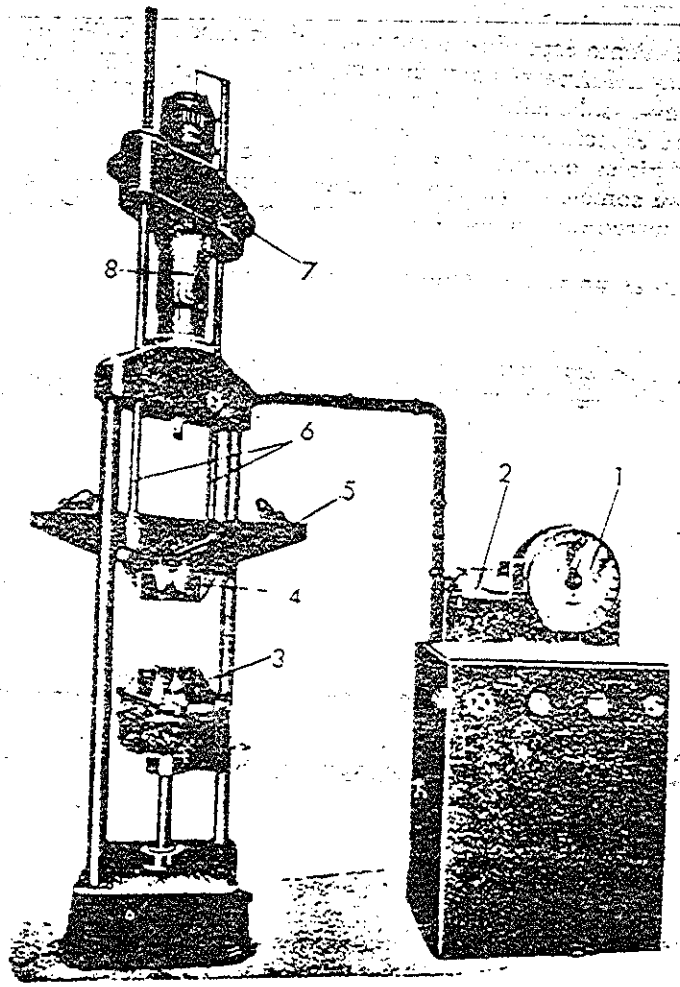


Fig. 24.—Máquina para ensayo de resistencia a la tracción. 1—Indicador de fuerzas. 2—Registrador. 3—Mordaza fija. 4—Mordaza móvil. 5—Probeta. 6—Barras. 7—Travesaño.

Y la relación entre el alargamiento y la distancia inicial, expresado en tanto por ciento de esta distancia, se denomina alargamiento específico o alargamiento de rotura, y está expresado de la siguiente forma:

$$\text{Alargamiento en } \% = \frac{l_1 - l}{l} 100$$

El alargamiento específico da una idea de la capacidad que tiene el material para deformarse antes de romperse. En los materiales dieléctricos interesan solamente los valores del esfuerzo de tracción y del alargamiento específico correspondientes a la rotura.

Los materiales destinados a aislamientos de máquinas eléctricas raramente se someten a ensayos de tracción, pues son pocos los que en servicio sufren este tipo de esfuerzo. Pero en otros casos, por ejemplo los aislantes empleados para aislamiento de cables, la resistencia a la tracción es un valioso dato para juzgar sobre la calidad del material.

Ensayos de resistencia a la compresión y a la cortadura. Para la realización del ensayo de compresión, se coloca la probeta del material a ensayar entre las dos placas de compresión de una prensa, de forma que el eje de la probeta coincida exactamente con el eje de la prensa, y se aplica el esfuerzo de compresión.

También puede efectuarse este ensayo en la misma máquina utilizada para el ensayo de tracción, disponiendo la probeta en un utilaje especial que convierte el esfuerzo de tracción en esfuerzo de compresión (figura 25).

De la misma forma que ya se indicó para el ensayo de tracción, la probeta, antes de romperse, se deforma, reduciéndose su altura y ensanchándose su sección transversal.

Tampoco en este caso es necesario conocer la resistencia a la compresión de los materiales destinados al aislamiento de máquinas eléctricas pues en todos los casos, su valor es netamente superior a los esfuerzos a que están sometidos en servicio.

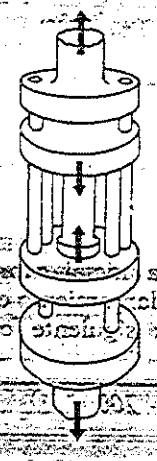


Fig. 25.—Disposición de la máquina anterior para ensayo de resistencia a la compresión.

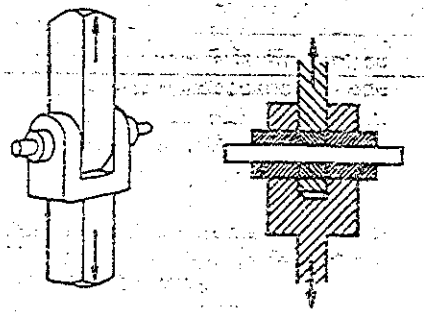


Fig. 26.—Disposición de la máquina anterior para ensayo de resistencia a la cortadura.

En cambio, es necesario conocer esta característica en los materiales utilizados para la construcción de aisladores, soportes aislantes y otras aplicaciones en las que están sometidas a elevados esfuerzos de compresión.

Para el ensayo de resistencia a la cortadura, se coloca la probeta en un utilaje especial, como el representado en la figura 26; este ensayo puede realizarse en la misma máquina que el ensayo de tracción.

Ensayo de resistencia a la flexión. Para realizar ensayo, puede procederse de dos formas: empotrar la probeta por uno de sus extremos, cargándola por el otro (figura 27), o bien apoyar la probeta por sus dos extremos y aplicar la carga en el centro (figura 28). Este segundo procedimiento es el más usual y recomendado.

Este ensayo consiste en determinar la flecha máxima que alcanza la probeta antes de su rotura y la carga máxima aplicable. Como hemos dicho, la carga se aplica en el centro de la probeta (figura 28) por medio de un botón de presión semicilíndrico, de 10 mm de radio, y se va aumentando gradualmente, a razón de 2 a 4 kg por segundo, desde cero hasta la rotura de la probeta.

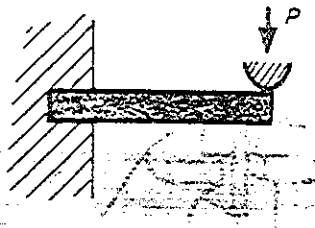


Fig. 27.—Ensayo de resistencia a la flexión (primer procedimiento).

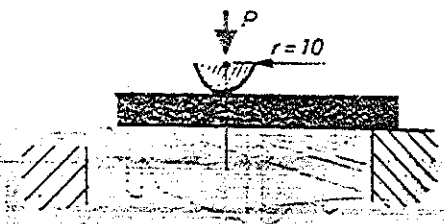


Fig. 28.—Ensayo de resistencia a la flexión (segundo procedimiento).

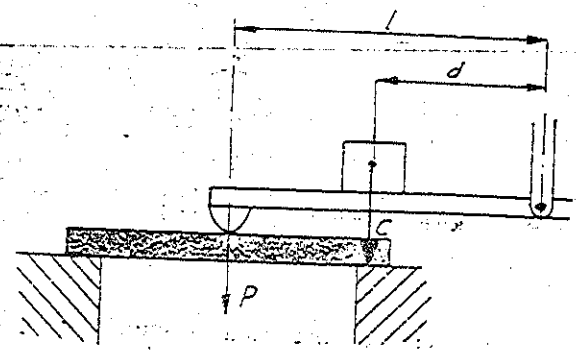


Fig. 29.—Procedimiento práctico para realizar el ensayo de resistencia a la flexión.

Un procedimiento práctico para la realización de este ensayo, es el que se muestra en la figura 29. No es muy exacto, pero sí resulta suficiente para la mayor parte de necesidades prácticas. Consiste en una barra, articulada por un extremo y que se apoya sobre el otro, por medio del correspondiente listón de presión, sobre el centro de la probeta. Sobre la barra, que constituye una palanca de segundo grado, desliza una carga *C*, con lo cual puede incrementarse de forma continua la carga aplicada a la probeta, sin más que acercarla cada vez más al botón de presión, es decir, al centro de la probeta. Según se expresa en la citada figura 29, la carga de rotura quedará determinada por la posición del peso *C* en el momento en que aquélla se produce, y se calcula mediante la fórmula

$$P = \frac{C \cdot d}{l}$$

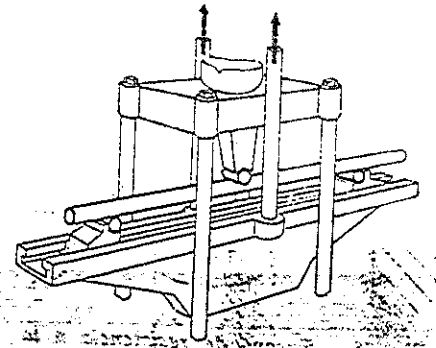


Fig. 30.—Dispositivo para el ensayo de resistencia a la flexión de materiales muy resistentes.

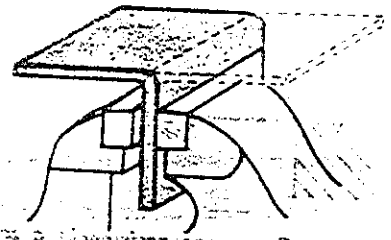


Fig. 31.—Ensayo de la flexibilidad de una tira de material aislante.

Para el ensayo de materiales de gran resistencia a la flexión, se utilizan máquinas mayores, provistas de dispositivos adecuados. Puede ser la misma máquina empleada para el ensayo de resistencia a la tracción aplicando un utilaje semejante al representado en la figura 30, que convierte el esfuerzo de tracción en esfuerzo de compresión para flexar la probeta.

Los esfuerzos de flexión son los que más frecuentemente se presentan en los aislamientos de aparatos eléctricos por lo que debe darse a este ensayo la importancia que realmente tiene.

Flexibilidad y plegabilidad. Se incluye aquí la descripción de estas dos características porque están muy directamente relacionadas con la resistencia a la flexión y conviene tenerlas en cuenta en los aislantes de poco espesor.

La *flexibilidad* se mide por el número de veces que una tira del material ensayado puede doblarse en uno u otro sentido, antes de que aparezcan las primeras grietas.

Para el ensayo de flexibilidad, se fija la probeta en un tornillo de banco con los cantos redondeados (figura 31) y se somete a sucesivas dobleces en ambos sentidos, hasta su rotura.

En cuanto a la *plegabilidad*, indica el número de plegados consecutivos que puede resistir una tira del material sometido a ensayo, antes de romperse.

Para determinar la plegabilidad de una lámina de material aislante, suele utilizarse un aparato especial (figura 32), constituido por dos pares de rodillos y una plancha ranurada, animada de un movimiento alternativo. La tira del material a ensayar, se pasa entre los rodillos y la ranura, tal como puede apreciarse en la citada figura 32.

Ensayo de resistencia al choque. La resistencia al choque de un determinado material, no tiene siempre un valor fijo, sino que varía

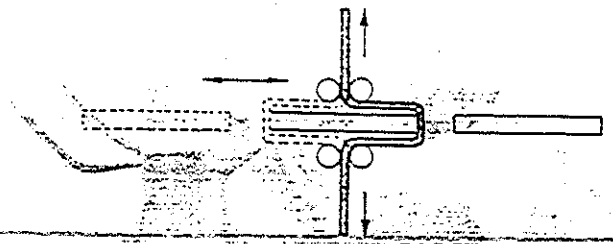


Fig. 32.—Ensayo de plegabilidad de una tira de material aislante.

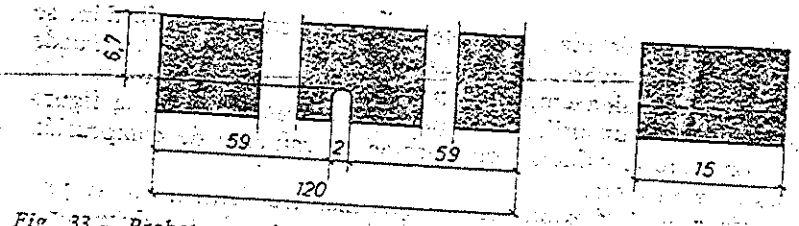


Fig. 33.—Probeta para el ensayo de resistencia al choque de un material aislante.

considerablemente según la forma de la probeta y el procedimiento de efectuar el ensayo. Por esta razón, solamente se pueden comparar los valores de diferentes materiales, cuando se hayan obtenido con ensayos exactamente iguales.

Las probetas pueden ser de sección rectangular, igual que las utilizadas para los ensayos de flexión, con sus caras completamente lisas, o bien de esta misma forma, pero con una entalla transversal en una de sus caras, según se expresa en la figura 33.

El ensayo de resistencia al choque se realiza en máquinas especiales, semejantes a las empleadas para este mismo ensayo con los metales.

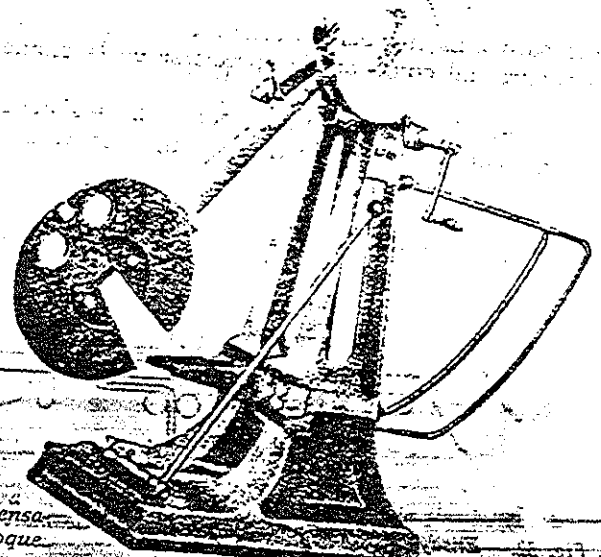


Fig. 34.—Péndulo para ensayo de resistencia al choque.

Una máquina de este tipo (figura 34) consta de un péndulo que se deja caer por su propio peso, golpeando la probeta del material a ensayar que, previamente, se ha colocado apoyada por sus extremos.

Este ensayo ha de realizarse, como mínimo, cinco veces a la temperatura normal, para poder considerar los resultados como buenos.

La resistencia al choque es una característica importante a considerar en los materiales aislantes pues hay muchos aparatos eléctricos, tales como interruptores, contactores, relés, etc., en los que los aislamientos están frecuentemente sometidos a fuertes esfuerzos de choque.

Ensayo de dureza. Al definir la dureza como una de las propiedades de los materiales aislantes, hemos dicho que es la resistencia que opone el material a ser penetrado por una bola o por un punzón. Como por lo general, los aislantes son materiales de poca dureza, no se emplea casi nunca el punzón en los ensayos, sino solamente la bola.

Por lo tanto, en el caso de materiales aislantes el ensayo de dureza consiste en comprimir una pequeña bola de acero sobre la superficie del material. La bola de acero tiene un diámetro de 5 mm y se presiona sobre el centro de la probeta con una fuerza constante de 50 kg (figura 35). Según que la superficie y profundidad de la huella practicada sean mayores o menores, la dureza del material ensayado será, respectivamente, menor o mayor; es decir, que, como es lógico, la dureza del material será tanto mayor cuanto menor sea la huella.

El valor de la dureza está determinado por la siguiente fórmula:

$$D = \frac{P}{\pi\, d\, h}$$

P = fuerza de compresión en kg
d = diámetro de la huella en cm
h = profundidad de la huella en cm

El ensayo de dureza debe realizarse diez veces, con dos probetas, es decir, cinco ensayos con cada probeta, a la temperatura ambiente. Se

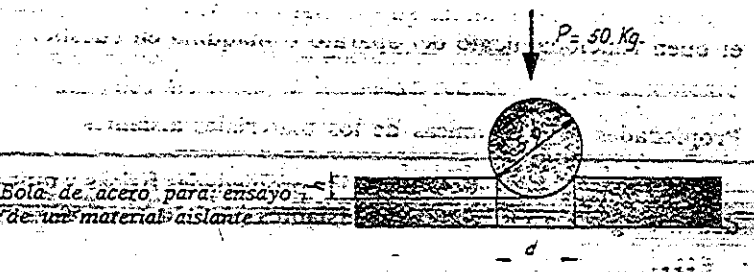


Fig. 35.—Bola de acero para ensayo de dureza de un material aislante.

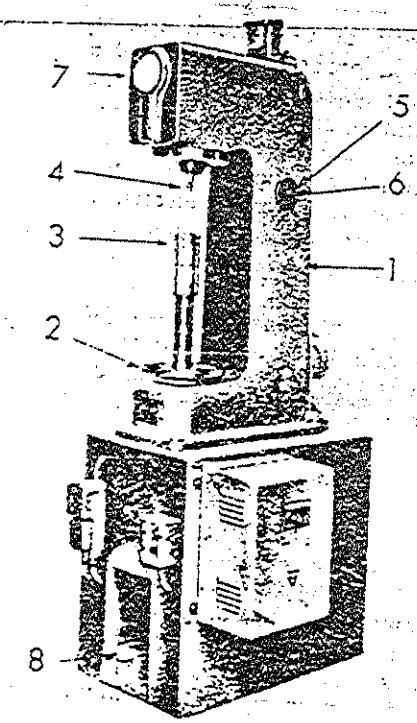


Fig. 36.—Máquina para ensayo de dureza. 1—Bastidor. 2—Husillo. 3—Bloque de apoyo. 4—Portabolas intercambiable. 5—Botón para regular la carga. 6—Tornillo para fijación del botón anterior. 7—Indicador de carga. 8—Pedal de puesta en marcha.

considerará como valor definitivo de la dureza, el valor medio de los obtenidos en los diez ensayos.

El aparato empleado para la determinación de la dureza de los materiales aislantes puede ser uno de los que se emplean para los metales. En la figura 36 se muestra uno de estos aparatos.

Es interesante la medida de la dureza en muchos materiales aislantes, ya que esta propiedad está relacionada con otras como por ejemplo, de forma directa, la resistencia al desgaste. En muchas aplicaciones eléctricas, en aparatos donde los aislantes están en constante movimiento o sometidos a golpes, compresiones y roces, el escoger un material con buena dureza superficial representa ya una garantía para el buen funcionamiento del aparato o máquina en cuestión.

Propiedades físico-químicas de los materiales aislantes

A continuación estudiaremos las propiedades físicas y químicas que deben exigirse a los materiales aislantes para su buen servicio en ma-

quinas e instalaciones eléctricas. Para el mejor estudio de estas propiedades, las clasificaremos de la forma siguiente:

1. *Propiedades físicas.*
2. *Propiedades térmicas.*
3. *Propiedades químicas.*

Propiedades físicas de los materiales aislantes

Entre estas propiedades, se incluyen las siguientes:

a) *Peso específico.*
b) *Porosidad.*
c) *Higroscopicidad.*

que vamos a definir a continuación.

Peso específico. Recordaremos que *peso específico* de un material es el peso de la unidad de volumen de dicho material. El peso específico suele expresarse en gramos por centímetro cúbico (gr/cm^3).

Porosidad. Es la propiedad que tienen todos los cuerpos de dejar espacios vacíos, o poros, entre sus moléculas, gracias a lo cual pueden ser comprimidos o dilatados y hacerse permeables a los gases y aun a los líquidos.

La porosidad constituye un gran inconveniente de la buena calidad de los materiales aislantes, pues en los poros se acumula humedad y el polvo del ambiente en que se encuentran. Pero aún en el caso de que el ambiente no sea húmedo ni polvoriento, el aire que llena los poros, por la acción del campo eléctrico, se ioniza, perdiendo el material sus propiedades aislantes y ocasionando su pronta destrucción.

Higroscopicidad. Se denomina *higroscopicidad* o *poder higroscópico* a la capacidad de absorción de la humedad que tiene un material.

Casi todos los aislantes absorben humedad, algunos en proporciones elevadas, otros en cantidades despreciables. La higroscopicidad de un material aislante constituye una consecuencia directa de la propiedad anterior, la porosidad, ya que es en los poros donde se aloja el agua, la cual se incorpora al material procedente de la humedad atmosférica o del ambiente húmedo en que se encuentra dicho material.

En los materiales aislantes, la humedad reduce considerablemente la rigidez dieléctrica y la resistencia de aislamiento. Por consiguiente, y siempre que sea posible, se preferirán los aislantes de menos higroscopicidad. En algunas ocasiones, para reducir los efectos de la humedad, se reviste el material de una capa impermeable.

Propiedades térmicas de los materiales aislantes

Interesa considerar, principalmente, en las aplicaciones eléctricas de los aislantes, las siguientes propiedades térmicas:

a) *Calor específico.*
b) *Conductividad térmica.*
c) *Inflamabilidad.*
d) *Temperatura de seguridad.*

Calor específico. El *calor específico* de un material, es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado centígrado, la temperatura de un gramo de dicho material.

Se comprenderá fácilmente que en los materiales destinados para su aplicación como aislantes, interesa siempre que el calor específico sea lo más elevado posible, con objeto de que al estar sometido el material a la acción del calor, su elevación de temperatura sea pequeña puesto que, como se verá más adelante, las altas temperaturas ocasionan graves daños en estos materiales.

Conductividad térmica. Se llama así a la facilidad que un material presenta al paso del calor. Cuanto menor sea la conductivilidad térmica de un aislante, con mayor dificultad permitirá la transmisión del calor, generado en el conductor eléctrico por efecto Joule, a los cuerpos vecinos y al ambiente que le rodea. Por esta razón, las piezas aislantes de los aparatos eléctricos interesa que estén construidas con materiales de baja conductividad térmica para que puedan tomarse con las manos sin que sea apreciable el efecto del calor.

Inflamabilidad. Es la facilidad que tiene un material para inflamarse. Algunos aislantes son muy inflamables mientras que otros sólo lo son ligeramente y otros son completamente ininflamables. Siempre que sea posible se ha de preferir el menos inflamable, el cual ofrecerá en todo momento una mayor seguridad de funcionamiento, sobre todo si ha de trabajar a altas temperaturas, o en lugares con peligro de incendios, chispas, etc.

Temperatura de seguridad. La gran mayoría de materiales aislantes empleados en máquinas e instalaciones eléctricas, trabajan a temperaturas superiores a la del ambiente, debido a las pérdidas de energía que se producen, y que se manifiestan en forma de energía calorífica. La elevación de la temperatura de los aislantes altera sus características, disminuyendo su resistencia de aislamiento, su rigidez dieléctrica y también su resistencia mecánica, además que aumenta su facilidad para ser atacados por agentes químicos.

Por consiguiente, es muy importante conocer la capacidad de resistencia a la acción del calor o la temperatura límite a que pueden estar sometidos los aislantes sin que se produzca la degradación de sus características, que los conducirá a su destrucción. Esta es la que se denomina *temperatura de seguridad.*

Cuando por excesiva elevación de la temperatura se produce la destrucción del aislamiento de una máquina eléctrica, suele decirse que la máquina "se ha quemado". No obstante, la mayoría de las veces, esta avería se presenta sin que haya habido combustión en el sentido en que normalmente se entiende esta palabra, y muy raramente se presenta la producción de llamas. Debe tenerse en cuenta que la perforación del dieléctrico no se presenta inmediatamente al llegar a cierta temperatura crítica, sino que se produce por la acción prolongada de dicha temperatura.

Antes de su destrucción propiamente dicha, muchos aislantes, al alcanzar cierta temperatura, se ablandan y deforman; se dice entonces que han alcanzado su *punto de reblandecimiento.*

Naturalmente, la temperatura de seguridad anteriormente citada y que es la máxima a que puede trabajar el aislante, ha de ser inferior a la temperatura en que alcanza su punto de reblandecimiento.

Muchos materiales aislantes tienen un punto de reblandecimiento bajo: en la mayoría de ellos, la temperatura de seguridad es inferior a 90° C. Esto resulta satisfactorio durante las operaciones de moldeo, cuando se trata de fundirlos para darles forma, pero es un gran inconveniente para su utilización, pues no pueden someterse a temperaturas elevadas.

El punto de reblandecimiento, o temperatura en que se inicia la pérdida de cualidades del material, no está bien definido. Más que un punto es una zona de temperaturas. Además, se puede comprobar que, si al mismo tiempo que se va elevando la temperatura de un aislante, se le tiene sometido a un esfuerzo mecánico, la destrucción sobreviene antes de lo que cabría esperar.

Por lo tanto, deberá fijarse la temperatura máxima a que puede trabajar un material aislante, o temperatura de seguridad, teniendo muy en cuenta las anteriores consideraciones.

Propiedades químicas de los materiales aislantes

Los materiales que constituyen los aislamientos de las máquinas, aparatos e instalaciones eléctricas están frecuentemente sometidos a la acción de ambientes que contienen líquidos, gases y vapores corrosivos, que ocasionan su lento pero continuo envejecimiento, acabando por su destrucción. A la acción destructiva de los agentes químicos,

se une la del campo eléctrico, que actúa desfavorablemente sobre los aislamientos por medio de las descargas que se producen con las elevadas tensiones, descargas muchas veces visibles en la oscuridad, especialmente cuanto la tensión aumenta, en cuyo caso llegan a hacerse bien visibles en forma de penachos luminosos. El campo eléctrico transforma parte del oxígeno del aire en ozono, de gran poder oxidante, como veremos seguidamente, y que actúa nociva e intensamente sobre los materiales aislantes. Por estas razones, se hace necesario que los materiales que se han de utilizar como aislantes, tengan buenas propiedades químicas.

En general, los aislantes se caracterizan por su buena resistencia química. Es bien conocida su resistencia a productos químicos que atacan el acero y el latón. Incluso, algunos aislantes resisten los efectos del ácido fluorhídrico, que ataca el cristal. Las propiedades que pueden indicar la conveniencia de utilizar un material aislante en las aplicaciones electrotécnicas, son las siguientes:

a) *Resistencia al ozono.*
b) *Resistencia a la luz solar.*
c) *Resistencia a los ácidos y a los álcalis.*
d) *Resistencia a los aceites.*

Resistencia al ozono. El *ozono* es una forma alotrópica del oxígeno, cuya fórmula química es O_3, es decir, que tiene una molécula constituida por tres átomos de oxígeno (~~la fórmula del oxígeno molecular ordinario es O_2, o sea que está constituida por dos átomos de oxígeno~~). El ozono se produce al ionizarse el aire por acción del campo eléctrico; es mucho más oxidante que el oxígeno ordinario y fácilmente reconocible por su olor a marisco.

Los materiales empleados para aislamiento de cables están a veces sometidos a la acción del ozono desprendido, sobre todo cuando las tensiones de servicio son elevadas. Como hemos dicho anteriormente, el ozono es un poderoso oxidante ~~y es la causa del fuerte olor que se aprecia después de las tormentas o cuando se producen descargas eléctricas~~. Para contrarrestar, en lo posible, sus efectos, se utilizan sustancias especiales denominadas antioxidantes.

Resistencia a la luz solar. Debido a su contenido de radiaciones ultravioletas, la luz solar provoca reacciones químicas, especialmente en verano. Las quemaduras producidas por el sol es uno de sus efectos y otros, son los cambios químicos provocados en muchos materiales aislantes.

Los efectos de la luz solar sobre los aislantes son: su decoloración y transformación en un material frágil, que puede resultar inadecuado

para la misión que debía cumplir. En los aislantes que ya son incoloros no se produce, naturalmente, la decoloración sino que, por el contrario, se observa una tonalidad amarillenta que se acentúa con el tiempo.

Resistencia a los ácidos y a los álcalis. Una de las más ventajosas propiedades de muchos aislantes es su conocida resistencia a los efectos destructivos de los ácidos y de los álcalis. Aunque el grado de resistencia a estas sustancias es variable, por lo general, el ataque es lento y aumenta con la temperatura.

El efecto de los ácidos y de los álcalis sobre los materiales aislantes difiere de su efecto sobre los metales, pues éstos se disuelven por la acción de los ácidos, mientras que por lo general, los aislantes se descomponen por la acción de los ácidos fuertes y de los álcalis. Esta descomposición se manifiesta primero por un ablandamiento y, a veces, por un aumento de volumen del material afectado, resultando notablemente disminuidas sus propiedades mecánicas y eléctricas.

No obstante, como ya se ha indicado anteriormente, la acción perjudicial de estos agentes químicos sobre casi todos los aislantes, es lenta. Puede decirse, que en general, la resistencia química de los materiales aislante es buena y han resuelto casi todos los problemas de corrosión que tenía planteados la industria.

Resistencia a los aceites. En general, los aislantes son resistentes a la penetración del aceite y a la pérdida de resistencia por esta causa, tanto si se trata de aceites minerales, vegetales o animales.

Ensayo de las propiedades físico-químicas de los materiales aislantes

Como se ha dicho anteriormente, a propósito de las propiedades mecánicas y eléctricas, a continuación se describirán brevemente los ensayos o pruebas con los que se determinan o comprueban las características físico-químicas expuestas en el párrafo anterior. No se explicarán todos los ensayos, sino solamente los más interesantes para el electricista.

Determinación del peso específico. Para determinar el peso específico de un aislante bastará obtener del mismo una probeta de forma regular, pesarla exactamente y dividir su peso en gramos por su volumen en centímetros cúbicos. El cociente dará el peso específico del material, expresado en g/cm^3.

Ensayo de higroscopicidad. Es de gran importancia considerar la higroscopicidad o capacidad de absorción de agua en los aislantes que

han de estar en contacto con el aire y, más aún, en los que deben trabajar en ambientes húmedos, por la influencia, citada varias veces, de la humedad sobre las cualidades dieléctricas de estos materiales.

El ensayo de absorción de la humedad tiene por objeto medir la cantidad de agua que es capaz de absorber una probeta sumergida en agua durante un tiempo y a una temperatura determinados. Muchas veces, en lugar de medir la absorción de agua interesa más conocer la variación de las propiedades dieléctricas del material ensayado después de permanecer durante cierto tiempo en un ambiente de humedad relativa. Los grados de humedad más empleados para estas pruebas son los del 65 por 100 y del 80 por 100. Los ambientes con estos grados de humedad se consiguen mediante disoluciones especiales, en recipientes cerrados. En el fondo del recipiente se dispone la disolución y sobre una rejilla, convenientemente protegida del contacto del líquido mediante unos pies de cristal o de porcelana, se colocan las probetas a ensayar. Durante el ensayo deberá mantenerse la temperatura a unos 25° C.

Ensayo de resistencia al calor. Ya se ha indicado anteriormente que no existe un punto de reblandecimiento bien definido, sino que se trata más bien de una zona de temperaturas. También se ha dicho que, si el material aislante además de estar sometido a la acción del calor, está sometido a un esfuerzo mecánico, la zona de temperaturas que corresponde al reblandecimiento aparece antes. Por estas razones, resulta difícil determinar exactamente cuál es la temperatura máxima que podrá resistir el material sin sufrir daños. Naturalmente, en los ensayos deberán suponerse las condiciones más desventajosas. Por esto, el ensayo que vamos a describir se realiza sometiendo la probeta también a un esfuerzo mecánico.

Se trata del denominado *ensayo Martens*, en el que se mide la temperatura, por encima de la cual, una probeta sometida a una carga de flexión constante y a una temperatura creciente, toma una flecha dada. A esta temperatura se le da el nombre de *grado Martens*.

Las probetas para este ensayo tienen unas medidas de 120 × 15 × 10 mm y la prueba se efectúa en el *aparato Martens*.

La probeta se fija firmemente entre las dos bridas y se coloca el contrapeso en posición tal que se produzca en la probeta una presión de 50 kg/cm². En estas condiciones, se introduce el conjunto en un horno cuya temperatura se va elevando a razón de 50° C cada hora. Por la acción conjunta del calor y del esfuerzo mecánico, la probeta se deformará. Cuando, a consecuencia de la deformación, el extremo superior de la probeta se haya desplazado 1,5 mm lo que corresponde a un desplazamiento de 6 mm en el extremo del palpador colocado al final de la palanca, se mide la temperatura que, por definición es el grado Martens.

Clasificación de los materiales aislantes según la temperatura de servicio

Un criterio muy interesante para clasificar los materiales aislantes, y que ha sido adoptado universalmente, es el que hace referencia a la temperatura máxima de funcionamiento continuo que puede alcanzar un material aislante determinado.

Esta clasificación fue iniciada en Estados Unidos por la A.I.E.E. (American Institute of Electrical Engineers) y adoptada posteriormente por la C.E.I. (Comisión Electrotécnica Internacional), estableciendo varias clases térmicas que, posteriormente han tenido que ampliarse y completarse para obtener el máximo provecho de los nuevos materiales que la investigación científica ha ido desarrollando, especialmente en el campo de las siliconas y otros altos polímeros.

Los siguientes conceptos generales pueden resultar útiles en la elección de los valores adecuados de elevación de temperatura, para condiciones particulares de funcionamiento:

1.° El fallo de un material aislante no se produce de una manera brusca, con perforación inmediata al llegar a la zona de temperatura crítica, sino por deterioro mecánico gradual con el tiempo. Por esta razón, a la pregunta de cuál es la temperatura que puede soportar un material aislante, solamente puede responderse sobre la base de cuanto tiempo ha de estar sometido a dicha temperatura.

El tiempo y la temperatura, actuando conjuntamente, disminuyen la resistencia mecánica de los aislantes de estructura orgánica, haciéndolos más quebradizos y provocando, a la larga, su desintegración bajo la acción de vibraciones o de esfuerzos mecánicos importantes.

2.° La resistencia eléctrica de un material aislante, no puede relacionarse directamente con su resistencia mecánica. Por lo general, la rigidez dieléctrica aumenta inicialmente, mientras disminuye su resistencia mecánica, debido a la eliminación de humedad. Después, la rigidez dieléctrica decrece, pero no cae por debajo de su valor inicial hasta que, prácticamente, su resistencia mecánica se ha anulado completamente. Finalmente, su desintegración física es la causa de su fallo eléctrico.

De esta forma, el tiempo en que un material aislante conserva sus propiedades dieléctricas no depende solamente del material utilizado sino también de sus propiedades mecánicas y del valor de los esfuerzos mecánicos a que está sometido.

3.° La vida de un material aislante depende también del acceso de oxígeno, humedad, productos químicos, etc., al interior de su estructura.

4.° La vida de un material aislante depende también en buen grado del tiempo que trabaja y de la carga que soporta realmente durante

su funcionamiento. Estos factores de utilización intermitente y de carga variable son especialmente importantes en los aparatos de pequeña potencia.

5.° También debe tenerse en cuenta que el deterioro físico de un aislante depende considerablemente de la temperatura a que está sometido, aumentando rápidamente si ésta aumenta.

6.° La temperatura ambiente afecta directamente a la temperatura que alcanzan las máquinas y aparatos eléctricos en funcionamiento.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, se han establecido las bases para fijar los límites de temperatura de los materiales aislantes. Estas bases son:

1.ª La clasificación de los materiales aislantes en función de las temperaturas límites de funcionamiento que se les puede asignar razonablemente.

2.ª Elección de un valor adecuado de temperatura ambiente límite que, al ser restado de las temperaturas límites anteriores, proporcionan los valores límites de aumento de temperatura.

De acuerdo con lo expuesto, los materiales aislantes se agrupan en las clases siguientes:

Clase Y (temperatura límite de trabajo, 90° C):

Aislamiento compuesto de materiales o asociaciones de materiales tales como algodón, seda y papel sin impregnación. Otros materiales o asociaciones de materiales pueden estar comprendidos en esta clase, si la experiencia o ensayos de reconocida garantía muestran que son capaces de funcionar a la temperatura de 90° C, señalada anteriormente (se incluyen en esta clase, el polietileno reticulado, papeles y cartones aislantes sin impregnar, fibra vulcanizada, madera, etc.).

Clase A (temperatura límite de trabajo, 105° C):

Aislamiento compuesto de materiales o asociaciones de materiales tales como algodón, seda y papel, cuando están convenientemente impregnados o bien cuando están sumergidos en un dieléctrico, como el aceite. Un aislante se considera impregnado cuando el aire entre sus fibras, está reemplazado por una sustancia adecuada, aun cuando ésta no rellene completamente los espacios entre los conductores aislados. Las sustancias impregnantes se considerarán adecuadas cuando tengan buenas propiedades aislantes, y cubran completamente las fibras, adhiriéndolas entre sí y al conductor; no deben producirse intersticios en su interior, como consecuencia de la evaporación del disolvente o

por cualquier otra causa, ni deben fluir durante el funcionamiento de la máquina a plena carga o a la temperatura límite especificada, ni deben deteriorarse indebidamente por la acción prolongada del calor. Entre los materiales aislantes incluidos en esta clase térmica, pueden citarse:

1.° Algodón, seda, papel, impregnados o sumergidos en dieléctrico líquido.
2.° Materiales moldeados o estratificados con relleno de celulosa.
3.° Láminas y hojas de acetato de celulosa y otros derivados de celulosa de propiedades semejantes.
4.° Fibra vulcanizada y madera, convenientemente impregnadas.
5.° Policloruro de vinilo.
6.° Barnices aislantes a base de resinas naturales, asfaltos naturales y fenólicos modificados.

Clase E (temperatura límite de trabajo, 120° C):

Aislamiento compuesto a base de materiales o asociaciones de materiales que, por la experiencia o por ensayos de reconocida garantía, muestran que son capaces de funcionar a la temperatura de 120° C, o bien su estabilidad térmica permite utilizarlos a una temperatura superior en 15° C a las de los materiales de la clase A. Como ejemplo de materiales aislantes de esta clase, se pueden citar:

1.° Esmaltes a base de acetato de polivinilo, esmaltados cubiertos con fibras naturales o artificiales.
2.° Papel baquelizado, películas de tereftalato de polietileno. fenólicas u otras resinas de características semejantes.
3.° Moldeados y estratificados con base de algodón o papel y resinas
4.° Barnices de resinas alquídicas.

Clase B (temperatura límite de trabajo, 130° C):

Aislamiento compuesto de materiales o asociaciones de materiales a base de mica, fibra de vidrio, amianto y otros materiales inorgánicos similares, con aglomerantes orgánicos adecuados. También pueden incluirse en esta clase, otros materiales o asociaciones de materiales que, sin ser inorgánicos la experiencia o ensayos de reconocida garantía han demostrado que son capaces de funcionar a la temperatura límite indicada de 130° C. Como materiales aislantes de clase B, se pueden citar:

1.° Esmaltes a base de resinas de poliuretanos.
2.° Tejidos de vidrio y de amianto impregnados con barnices a base de resinas sintéticas y de aceite.

3.° Mica y papel de mica aglomerada con goma laca, compuestos asfálticos y resinas alquídicas.
4.° Aislamiento de caucho etileno-propileno.
5.° Moldeados y estratificados de amianto y fibra de vidrio con resinas fenólicas, de melamina, epoxídicas o de poliéster.
6.° Tejidos de vidrio-amianto.
7.° Barnices de resinas de melamina, epoxídicas y de poliéster.

Clase F (temperatura límite de trabajo, 155° C):

Aislamiento compuesto de materiales o asociaciones de materiales tales como mica, fibra de vidrio, amianto y otros materiales inorgánicos similares, con aglomerantes orgánicos adecuados, así como otros materiales o asociaciones de materiales, aunque no sean de naturaleza inorgánica, y que la experiencia o ensayos de reconocida garantía han demostrado que son capaces de funcionar a la temperatura límite indicada de 155° C, ~~o bien que su estabilidad térmica permite utilizarlos a una temperatura superior en 25° C a la de los materiales de la clase B~~. Como ejemplo de estos materiales, se pueden citar:

1.° Tejido de fibra de vidrio tratado con resinas de poliéster.
2.° Mica y papel de mica, aglomerada con resinas de poliéster o con resinas epoxídicas.
3.° Estratificados a base de tejido de vidrio y resinas epoxídicas de gran resistencia térmica.
4.° Estratificados amianto-vidrio.

Clase H (temperatura límite de trabajo, 180° C):

Aislamiento compuesto de materiales tales como elastómeros de silicona o de asociaciones de materiales como mica, fibra de vidrio, amianto y otros materiales inorgánicos similares, con aglomerante adecuados, tales como resinas de siliconas apropiadas. Otros materiales o asociaciones de materiales también pueden incluirse en esta clase, si la experiencia o ensayos de reconocida garantía demuestran que son aptos para utilizarse a la temperatura límite, anteriormente indicada, de 180° C. Como ejemplos de materiales aislantes de clase H, se pueden citar:

1.° Aislamientos de elastómeros de siliconas.
2.° Tejidos de fibra de vidrio aglomerados con resinas de siliconas o recubiertos con elastómeros de siliconas.
3.° Mica y papel de mica aglomerados con siliconas.
4.° Estratificados de fibra de vidrio y resinas de siliconas.
5.° Barnices aislantes a base de resina de siliconas.

Clase C (temperatura límite de trabajo, superior a 180° C):

Aislamiento compuesto de materiales o asociaciones de materiales, tales como mica, porcelana, cuarzo, vidrio y materiales similares, con o sin aglomerante inorgánico. También pueden comprenderse en esta clase, otros materiales o asociaciones de materiales, si la experiencia o ensayos de reconocida garantía, demuestran que pueden utilizarse a temperaturas superiores a las de la clase H (180° C). En la clase C, un material o asociación de materiales determinados, tendrá un límite de temperatura que dependerá de sus propiedades físicas, químicas y eléctricas. Como ejemplo de materiales aislantes de clase C, se pueden citar:

1.° Mica pura y estratificados de papel de mica con aglomerante inorgánico.
2.° Estratificados de amianto y aglomerante inorgánico.
3.° Porcelana y materiales cerámicos.
4.° Vidrio y cuarzo.

En cada una de las clases térmicas citadas, pueden incorporarse, por razones de fabricación, cierta cantidad de materiales de clase térmica inferior. Para ello, se requiere que las propiedades eléctricas y mecánicas se mantengan con valores adecuados, cuando se utilicen a la temperatura máxima admitida.

Temperaturas límite de servicio de los materiales aislantes

Las clases térmicas de los materiales aislantes, expuestas en el parágrafo anterior, indican la temperatura máxima de servicio de estos materiales. Para completar esta cuestión, deben definirse otros conceptos, relacionados con la temperatura ambiente considerada como máxima y de la temperatura en el punto más caliente de una máquina o aparato, ya que en todos los dispositivos eléctricos hay un calentamiento desigual en sus partes constituyentes. A continuación se definen estos conceptos:

Temperatura del punto más caliente. Es la temperatura que, como máximo, puede alcanzarse en cualquier punto de una máquina o de un aparato eléctrico. Constituye, por lo tanto, el punto principal de referencia para proyectar los aislamientos de una máquina o de un dispositivo eléctrico.

Temperatura ambiente máxima. Para los efectos de calentamiento de máquinas y aparatos, se tomará como base una temperatura ambiente de 40° C.

Valores máximos de aumento de temperatura. Estos valores se obtienen restando los 40° C correspondientes al valor de la temperatura ambiente máxima, de la temperatura del punto más caliente.

En la tabla que sigue a continuación, se indican los valores de aumento de temperatura según la clase térmica de los materiales aislantes empleados.

TABLA 22. TEMPERATURAS LÍMITES SEGÚN LA CLASE DE AISLAMIENTO

1	2	3	4	5	6
Clase de aislamiento	Temp. ambiente máxima °C	Aumento medio de temp. sobre el ambiente °C	Temp. límite media °C	Aumento máximo de temp. en el punto más caliente °C	Temp. máxima en el punto más caliente °C
Y	40	45	85	50	90
A	40	60	100	65	105
E	40	75	115	80	120
B	40	80	120	90	130
F	40	100	140	105	155
H	40	125	165	140	180

Observaciones a la tabla anterior:

1.ª Las cifras de la columna 4 son valores medios y se obtienen sumando las cifras de las columnas 2 y 3.

2.ª Las cifras de la columna 6 son las correspondientes a las temperaturas máximas en el punto más caliente. Son las indicadas como temperaturas límite de servicio en las distintas clases térmicas y se obtienen sumando las cifras de las columnas 2 y 5.

3.ª Las cifras de la columna 6 exceden a las de la columna 4 entre 5 y 15° C, según la clase térmica del aislante considerado.

5 Materiales cerámicos empleados en electrotecnia

Definición y propiedades generales

Los materiales cerámicos están fabricados por procedimientos especiales (conformado y cocción en hornos) a base exclusivamente de productos inorgánicos (es decir, que no contienen carbono) de alto punto de fusión. Las mezclas se forman añadiendo agua a la substancia molida, para formar una masa o pasta que adquiera consistencia antes de la cocción; se da a la masa la forma deseada por vaciado, a presión o por torneado y los objetos se cuecen en hornos a temperaturas de hasta 1.800° C; por sinterización, recristalización y fusión de los pequeños componentes vítreos, pasan a formar la pieza terminada, con una contracción de volumen, que resulta siempre de cierta importancia. Por lo general, las piezas acabadas, se revisten con un barniz vitrificante blanco o coloreado.

En Electrotecnia se emplean los materiales cerámicos como aislantes, cuando son necesarias especiales condiciones de resistencia mecánica, de resistencia térmica, etc., junto con las cualidades específicamente dieléctricas. La composición de estos materiales no es exactamente la misma que la de los productos cerámicos ordinarios. Se preparan de la misma forma y se endurecen a continuación, mediante reacciones químicas, fenómenos de coagulación o de cristalización a elevada temperatura, etc. Todos los materiales cerámicos empleados en Electrotecnia tienen una resistencia excepcional al calor, a los cambios de temperatura y a la humedad. No son atacados por los álcalis ni por los ácidos, aun en fuerte concentración, excepción hecha del ácido fluorhídrico.

Los cuerpos fundamentales que entran en la composición de los materiales cerámicos son, esencialmente:

a) Silicatos alumínicos (arcilla, caolín, etc.)
b) Silicatos magnésicos (talco)

A estos componentes fundamentales se añaden otros muchos constituyentes secundarios, entre los que cabe citar: el cuarzo, el feldespato, la alúmina, el carburo silícico, etc., y que se añaden en proporciones adecuadas según las cualidades que deba tener el producto terminado.

Los materiales cerámicos empleados en la técnica de la alta frecuencia, que tienen elevada constante dieléctrica, no están constituidos a base de silicatos, sino que contienen óxido de titanio en elevada proporción. En lo que se refiere a su estructura, los materiales cerámicos empleados en Electrotecnia presentan todas las transiciones posibles, desde los cuerpos muy vitrificados (es decir, amorfos) hasta los de estructura totalmente cristalina.

Clasificación de los materiales cerámicos

Una primera clasificación parte de la permeabilidad de los materiales cerámicos:

a) *Materiales compactos*, es decir, estancos a la humedad, caracterizados por sus mejores propiedades mecánicas; estos materiales pueden barnizarse con un material vítreo.
b) *Materiales porosos*, o sea, no estancos a la humedad y que se caracterizan por sus mejores propiedades térmicas que los anteriores, en detrimento de sus propiedades mecánicas. Se emplean como soportes y aislantes de hilos incandescentes, calefacción eléctrica, etcétera). Resisten bien los cambios bruscos de temperatura, cualidad que se encuentra favorecida por la estructura porosa de estos materiales. No se pueden barnizar.

Según su composición básica, los materiales cerámicos se dividen en cinco grandes grupos, que se definen a continuación.

Grupo I. Comprende los materiales constituidos predominantemente por silicatos de aluminio (arcilla, caolín, etc.). Sus propiedades constituyen un término medio entre los materiales de los demás grupos. Se utilizan, sobre todo, para aisladores de baja y de alta tensión, a frecuencias industriales. Los materiales de este grupo son de estructura compacta; los más conocidos son la *porcelana* y la *loza vidriada*.

Grupo II. Comprende los materiales en cuya constitución entra, en gran proporción, los silicatos magnésicos (talco). Se caracterizan por su pequeño factor de pérdidas dieléctricas, gran resistencia mecánica y pequeña contracción de volumen antes y después de la cocción. Se emplean para aisladores de baja y alta tensión y también en aplicaciones de alta frecuencia. También son de estructura compacta y el material más representativo es la *esteatita*.

Grupo III. En este grupo se incluyen los materiales cerámicos con alta proporción de compuestos de titanio (principalmente, óxidos y silicatos). Se caracterizan por su elevada constante dieléctrica, con un reducido factor de pérdidas, incluso a altas frecuencias, por lo que resultan muy adecuados como dieléctricos de condensadores, especialmente en alta frecuencia. Son también de estructura compacta. Los más empleados son los que emplean el bióxido de titanio como material básico, y que se conocen con los nombres comerciales de *Condensa*, *Kerafar*, etc.

Grupo IV. En este grupo están incluidos los materiales a base de mezclas que contienen sustancias arcillosas y esteatitas en proporciones adecuadas, de forma que el material acabado tiene un coeficiente de dilatación muy reducido, lo cual evita que con fuertes variaciones de temperatura se produzcan tensiones mecánicas internas elevadas; por consiguiente, estos materiales son muy resistentes a los cambios de temperatura y se recomiendan especialmente en los casos en que puedan producirse fuertes calentamientos locales como, por ejemplo, en las protecciones de arcos de chispa y luminosos, bujías de encendido para automóviles, soporte para conductores de hornos eléctricos, etc. Son también de estructura compacta, aunque no se pueden barnizar. Se conocen con varios nombres comerciales, tales como *Ardostan*, *Sipa*, etc.

Grupo V. Al contrario que los materiales incluidos en los grupos anteriores, los de este grupo tienen estructura porosa. Están constituidos a base de masas arcillosas o de silicatos de magnesio y se caracterizan, sobre todo, por su gran resistencia al calor. Resultan materiales muy apropiados como soportes y aislamientos de conductores en calefacción eléctrica que es, precisamente, su principal campo de aplicación. Se conocen con diversos nombres comerciales: *Magnesolita*, *Termisol*, *Calodur*, *Morganita*, etc.

En nuestra explicación utilizaremos preferentemente la clasificación anterior.

Porcelana electrotécnica Formado por caolin, cuarzo, feldespato

La *porcelana electrotécnica* es el más importante de los materiales cerámicos empleados en Electrotecnia. Los materiales básicos que la constituyen, son los siguientes:

1) el *caolín o tierra de porcelana* que es un silicato de aluminio hidratado, cuya composición corresponde, aproximadamente, a la fórmula

$$Al_2O_3 - 2\,SiO_2 - 2\,H_2O$$

Se trata de un material blanco o ligeramente amarillento, muy blando y de tacto algo grasiento; su peso específico es de 2,2 a 2,6 kg/cm³. Se reblandece, sin fundir, a 1 880° C y absorbe fácilmente la humedad.

2) el *cuarzo u óxido de silicio*, de fórmula

$$SiO_2$$

material de gran dureza, que funde a 1 720° C, siendo su punto de reblandecimiento, de unos 1 500° C.

3) el feldespato, nombre genérico de un grupo de minerales petrogenéticos o formadores de rocas. Todos los feldespatos son silicatos anhidros de aluminio, con potasio, sodio y calcio. El feldespato potásico es el más empleado en la fabricación de la porcelana y su fórmula química aproximada es

$$K_2O - Al_2O_3 - 6\,SiO_2$$

Es un material duro y cuyo peso específico es de 2,6 kg/cm³. Es más fusible que el resto de los materiales que constituyen la porcelana electrotécnica, por lo que actúa como fundente y aglomerante de las partículas de caolín y de cuarzo.

Los tres componentes citados se mezclan bien y se amasan con agua, quitando las impurezas. El agua se elimina después mediante filtros-prensa. Dejando la masa humedecida durante cierto tiempo se vuelve plástica. Luego se espesa, amasándola y batiéndola. Antes de la cocción se le da la forma debida, mediante tres procedimientos distintos:

a) *Moldeo por prensado* que se emplea, sobre todo, para aplicaciones en baja tensión. Se denomina también *porcelana preparada por vía seca* y se obtiene por modelado, a presión, en moldes de acero, estando la porcelana reducida a polvo y ligeramente humedecida; con moldes apropiados pueden obtenerse piezas de formas muy variadas.

Con este procedimiento se consiguen piezas de dimensiones muy precisas, pero la porcelana obtenida es un material no uniforme, con grietas o fisuras, por lo que sus cualidades eléctricas no son tan buenas como en los otros procedimientos de obtención de la porcelana.

En cuanto al modelado, debe tenerse en cuenta la contracción de volumen producida por la ulterior cocción y la imposibilidad de obtener una contracción idéntica para todas las piezas, por mucho que se vigilen los hornos de cocción; a este respecto, se admite una tolerancia de ± 1,5 % en las dimensiones. También hay que tener en cuenta que el grosor debe ser suficiente para que la pasta no se rompa al sacarla del molde.

Como hemos dicho anteriormente, las porcelanas obtenidas por vía seca están especialmente adaptadas para su empleo en baja tensión: aisladores, cortacircuitos, soportes, etc.

b) *Moldeo a torno* utilizado principalmente para aplicaciones en alta tensión: aisladores de apoyo y de cadena, pasamuros, pasatapas, etcétera. Se denomina también *porcelana preparada por vía húmeda*, ya que los productos principales se obtienen con pastas de consistencia plástica, es decir, similar a la masilla. Se elaboran en formas y tamaños convenientes y se colocan en moldes de yeso, los cuales determinan la forma de la superficie exterior. A las superficies que no están en contacto con el molde se les da luego la forma deseada, trabajándolas a máquina o por presión. Las piezas se extraen de los moldes después de que se han secado parcialmente y tienen suficiente consistencia para poder manipularlas. Otro método de elaboración consiste en estirar a presión el material cuando está en estado plástico, dándole la forma de tubos o de barras, realizándose después las operaciones de acabado en un torno vertical de alfarero o en una máquina con ayuda de herramientas especiales: este procedimiento es el utilizado en la fabricación de aisladores de alta tensión.

La presión en las dimensiones es menor que en el procedimiento de moldes por prensado, descrito anteriormente, pero la porcelana obtenida conserva todas sus propiedades dieléctricas. En este caso, la tolerancia admitida en las dimensiones es de 2 %. Con este método de aplicación se puede obtener gran variedad de formas y de dimensiones, manguitos de paso, ranuras para aumentar las líneas de fuga de los aisladores, etc.

c) *Moldeo por colada*, es decir, *porcelanas preparadas por fundición*. Las piezas que han de tener gran rigidez dieléctrica y forma complicada, pueden elaborarse colando el material líquido en moldes de yeso, compuestos de varias partes. Las piezas coladas se extraen de

los moldes cuando han adquirido suficiente rigidez para poder ser manipuladas sin peligro de deformación. Las piezas moldeadas se secan, se llevan a las dimensiones especificadas, se barnizan y se someten a la cocción.

Antes de su moldeado, la pasta se divide en bloques que corresponden aproximadamente al tamaño de la pieza terminada. Los moldes para prensado o para colada acostumbran a estar constituidos por sustancias porosas muy higroscópicas tales como el yeso o la arcilla porosa.

Después de moldeadas, se secan las piezas y luego se cuecen, a una temperatura de unos 900° C (*cocido en bruto*) esmaltándolas después. El esmalte está constituido de la siguiente forma:

79,1 % de óxido silícico ($Si\ O_2$)
13,4 % de óxido alumínico ($Al_2\ O_3$)
4 % de óxido de calcio ($Ca\ O$)
1,2 % de óxido de magnesio ($Mg\ O$)
1,4 % de óxido de potasio ($K_2\ O$)

El esmalte se aplica con pincel o con pulverizador sobre las piezas cocidas en bruto o bien secas; algunas veces también por inmersión de las piezas en el baño de esmalte.

Después de esmaltadas, se procede a la cocción definitiva de las piezas, elevando lentamente la temperatura hasta 1 500° C, con lo que se forma un nuevo silicato, denominado *silimanita*, y cuya fórmula es

$$Al_2\ O_3 - Si\ O_2$$

mientras el resto de la masa comienza a fundirse. Durante la cocción, se reduce el volumen de la pieza, produciéndose una contracción que alcanza hasta un 40 % del volumen inicial.

El examen microscópico de la porcelana electrotécnica revela una masa de estructura análoga a la del vidrio, en la que se encuentran partículas amorfas, pequeños cristales, restos de cuarzo y de caolín y pequeñas burbujas de aire ocluido. Estas últimas, a pesar del proceso de fusión, no llegan a ponerse en comunicación entre sí, lo que explica la impermeabilidad de la porcelana para los gases y el agua. El volumen de los poros viene a ser de 2 a 5 % del volumen total.

El esmaltado, además de constituir el revestimiento protector de la porcelana, aumenta notablemente su resistencia mecánica, aunque no tiene influencia sobre las propiedades dieléctricas. Se considera que el esmaltado aumenta de un 20 a un 40 % las resistencia a la tracción y a la flexión, de la porcelana no esmaltada.

La composición aproximada de la porcelana electrotécnica para usos generales, es la siguiente:

50 % de caolín
25 % de cuarzo
25 % de feldespato

Esta porcelana, que podríamos considerar básica, tiene unas propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas de tipo medio. Si se quieren fabricar porcelanas especiales en las que predominen una o más de estas propiedades, deben modificarse las proporciones de los componentes básicos según se expresa en la figura 37: según puede apreciarse en la citada figura, el aumento del contenido de caolín aumenta

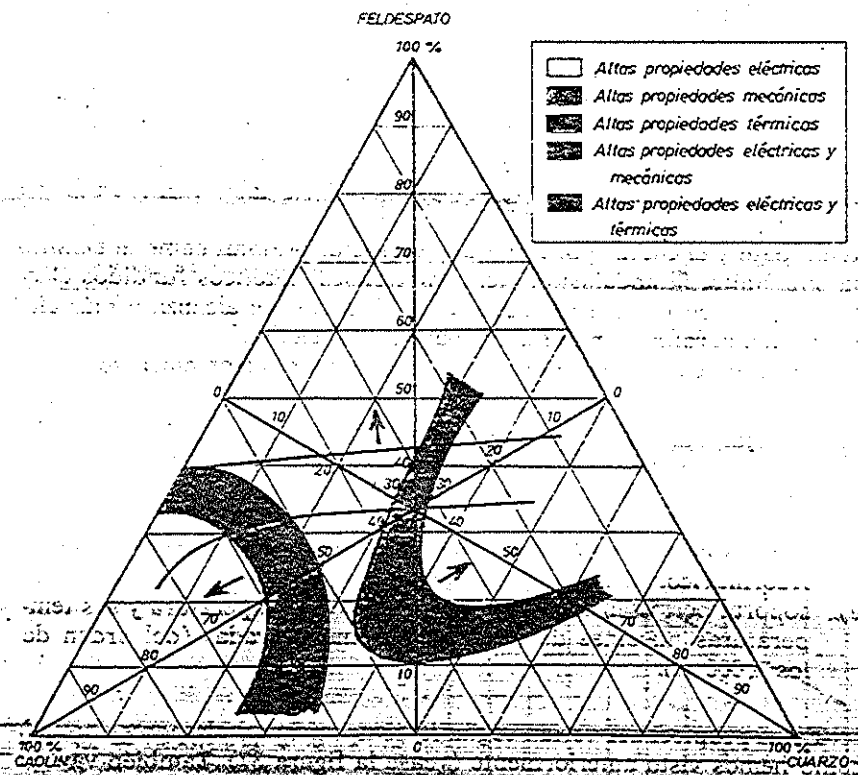


Fig. 37.—Influencia de la proporción de componentes básicos (feldespato, caolín y cuarzo) en las propiedades de la porcelana electrotécnica.

la resistencia térmica de la porcelana, pero a costa de las propiedades mecánicas; la elevación del porcentaje de cuarzo, aumenta también la resistencia mecánica, pero en detrimento de la resistencia térmica; finalmente, si crece el contenido de feldespato, se mejoran las propiedades eléctricas del producto final. De acuerdo con la citada figura y con una proporción adecuada de los diversos componentes, pueden obtenerse porcelanas de elevadas propiedades eléctricas y térmicas o eléctricas y mecánicas, pero no materiales con elevadas propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas, simultáneamente. Por ejemplo, una porcelana con la siguiente composición:

55 % de caolín
12 % de cuarzo
33 % de feldespato

tiene unas excelentes propiedades eléctricas y térmicas, pero sus propiedades mecánicas no serán tan buenas como las que hemos considerado porcelana "básica" o "media", que contiene un 25 % de cuarzo.

En vez del feldespato, o juntamente con éste, las mezclas pueden contener otros fundentes, tales como óxidos alcalinotérreos, óxido bórico, etc. y, en vez de cuarzo, otros materiales tales como óxido de zirconio, de titanio, etc. Otras porcelanas sustituyen enteramente el feldespato y el cuarzo por minerales refractarios, tales como la cianita, la silimanita, la andalusita, etc. o materiales sintéticos fundidos eléctricamente; en todos estos casos la vitrificación se alcanza a más elevadas temperaturas, por fusión parcial del caolín.

Las propiedades generales de la porcelana electrotécnica son:

a) excelentes características dieléctricas.
b) gran resistencia mecánica a la compresión y a la flexion y buena resistencia a la tracción y a la torsión.
c) impermeable al agua y a los gases.
d) inatacable por los álcalis y ácidos concentrados, excepto el ácido fluorhídrico.
e) soporta perfectamente grandes cambios de temperatura y sus temperaturas máximas de servicio son muy elevadas (del orden de los 1 000° C).

Estas propiedades varían según la composición de la porcelana, tal como hemos visto anteriormente (véase la figura 37). También varían según las condiciones de servicio, el espesor de la capa aislante, etc. A continuación se estudian los factores más importantes que influyen sobre las propiedades de este material.

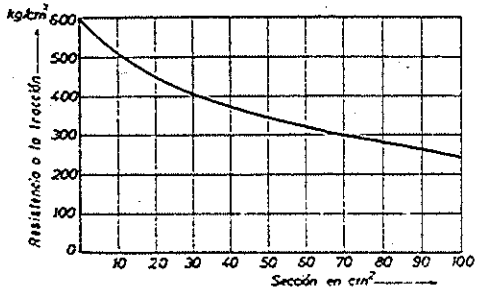


Fig. 38. — Resistencia a la tracción de la porcelana electrotécnica, en función de la sección.

Preguntar los grafos

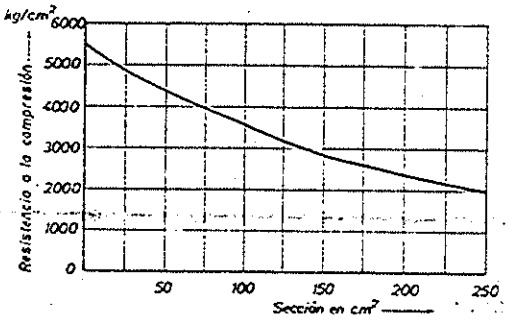


Fig. 39. — Resistencia a la compresión de la porcelana electrotécnica, en función de la sección.

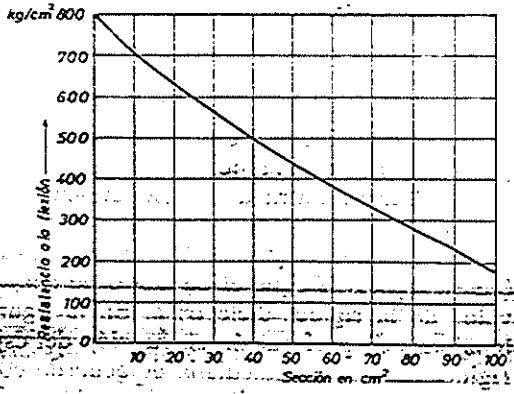


Fig. 40. — Resistencia a la flexión de la porcelana electrotécnica, en función de la sección.

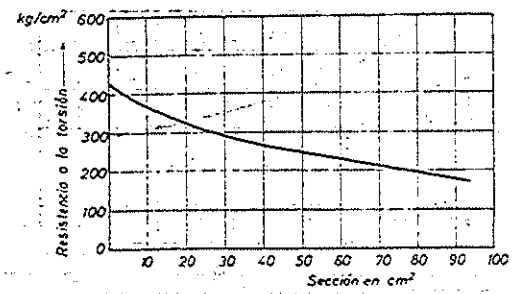


Fig. 41.—Resistencia a la torsión de la porcelana electrotécnica, en función de la sección.

La resistencia mecánica disminuye con la sección. En las figuras 38 a 41 se muestran, respectivamente, las resistencias a la tracción, a la compresión, a la flexión y a la torsión de probetas macizas y lisas de porcelana dura cuidadosamente esmaltadas.

La sensibilidad de la porcelana respecto a los cambios de temperatura se determina mediante una prueba en la que la probeta se sumerge varias veces, y alternativamente, en un baño caliente y otro frío, cuya diferencia de temperatura es de 70° C; se considera que la porcelana es de buena calidad si, sometiéndola tres veces a esta prueba, no se presenta defecto alguno. La excelente resistencia de la porcelana a las variaciones de temperatura, se debe a su pequeño coeficiente de dilatación y a su elevada resistencia mecánica.

Es muy importante conocer la resistencia de la porcelana a las temperaturas elevadas, teniendo en cuenta los arcos que pudieran producirse durante el servicio. La porcelana tiene una temperatura de reblandecimiento de 1 500 a 1 700° C, según su composición, mientras que para el esmalte exterior esta temperatura es de unos 1 000° C; en todos los casos debe tenerse en cuenta el tiempo durante el cual actúa el calor.

La rigidez dieléctrica de la porcelana es elevada (de 34 a 38 kV/mm). Su valor depende, esencialmente, de estos tres factores:

a) Composición de la porcelana.
b) Espesor aislante.
c) Temperatura de funcionamiento.

En lo que se refiere a la composición, ya hemos dicho anteriormente (véase figura 37) que el aumento de contenido de feldespato eleva el valor de la rigidez dieléctrica. En la figura 42 pueden apreciarse las tensiones de perforación en función del espesor de la capa aislante, la rigidez dieléctrica calculada de acuerdo con estos datos, es de 27 kV/mm. En lo que se refiere a la acción de la temperatura de servicio

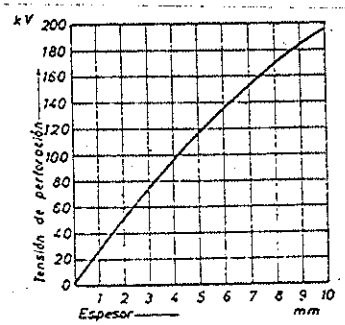


Fig. 42.—Tensión de perforación de la porcelana electrotécnica, en función del espesor.

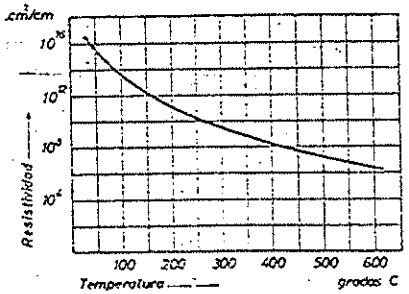


Fig. 43.—Resistividad de volumen de la porcelana electrotécnica, en función de la temperatura de servicio.

sobre el valor de la rigidez dieléctrica, puede decirse que, hasta unos 150° C, la rigidez dieléctrica es prácticamente independiente de la temperatura. Por encima de los 150° C, la porcelana va perdiendo sus propiedades dieléctricas, a medida que aumenta la temperatura.

También la resistividad de volumen depende mucho de la temperatura, tal como puede deducirse del examen de la figura 43.

Por otro lado, y tal como se expresa en la figura 44, cuando la temperatura de servicio sobrepasa de los 70° C, la porcelana experimenta una gran disminución en su resistencia a la perforación eléctrica, independientemente del tipo de corriente (alterna, continua o pulsatoria).

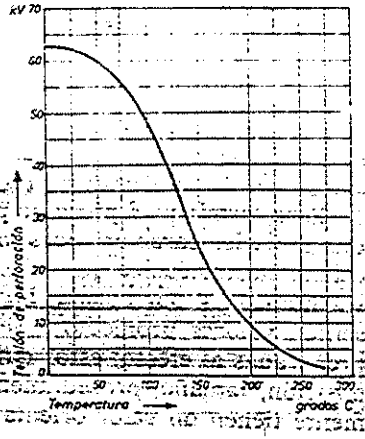


Fig. 44.—Tensión de perforación de la porcelana electrotécnica, en función de la temperatura de servicio.

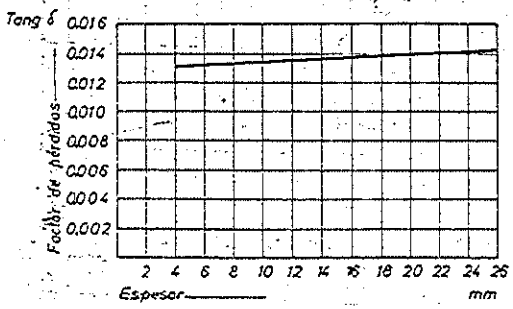


Fig. 45.—Factor de pérdidas dieléctricas de la porcelana electrotécnica, en función del espesor.

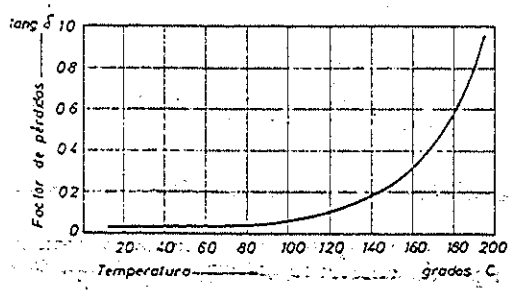


Fig. 46.—Factor de pérdidas dieléctricas de la porcelana electrotécnica, en función de la temperatura de servicio.

Finalmente, y en lo que se refiere al factor de pérdidas dieléctricas, se puede decir que el espesor del aislamiento influye muy poco sobre su valor (figura 45), mientras que, por el contrario, aumenta notablemente con la temperatura, tal como puede apreciarse en la figura 46.

Para terminar el presente parágrafo, a continuación se exponen en una tabla las características más interesantes de los tres tipos de porcelana electrotécnica que se han estudiado, es decir, por vía seca, por vía húmeda y por colada. Los datos expuestos en dicha tabla representan valores promedio y se han obtenido con probetas especiales preparadas al efecto; estos datos son variables y dependen de la composición, tamaño, procedimiento de fabricación, etc., por lo que solamente tienen un valor orientativo.

TABLA 23. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PORCELANA ELECTROTÉCNICA

Características	Procedimiento de preparación		
	Por vía seca	Por vía húmeda	Por colada
Estructura	Compacta	Compacta	Compacta
Porosidad	—	0	0
Absorción de agua en 24 horas, en %	0 ... 0,5	0	0
Peso específico en gr/cm³	2,3 ... 2,5	2,3 ... 2,5	2,3 ... 2,5
Resistencia a la tracción, en kg/cm² (con esmaltado)	100 ... 140	300 ... 500	—
Resistencia a la tracción, en kg/cm² (sin esmaltado)	70 ... 140	240 ... 300	—
Resistencia a la compresión, en kg/cm² (con esmaltado)	3 000 ... 4 000	4 000 ... 5 500	4 000 ... 5 500
Resistencia a la compresión, en kg/cm² (sin esmaltado)	3 000 ... 3 500	4 000 ... 4 500	4 000 ... 4 500
Resistencia a la flexión, en kg/cm² (con esmaltado)	600 ... 700	900 ... 1 000	900 ... 1 000
Resistencia a la flexión, en kg/cm² (sin esmaltado)	300 ... 600	400 ... 800	400 ... 800
Temperatura de reblandecimiento, en °C	~ 1 500	~ 1 500	~ 1 500
Temperatura máxima de servicio, en °C	1 000	1 000	1 000
Resistencia a la llama	Infusible	Infusible	Infusible
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	Superior a 10^{14}	Superior a 10^{14}	Superior a 10^{14}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 50 Hz	34 ... 38	34 ... 38	34 ... 38
Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 1 MHz	34 ... 38	34 ... 38	34 ... 38
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	5 ... 6,5	5 ... 6,5	5 ... 6,5
Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	5 ... 6,5	5 ... 6,5	5 ... 6,5
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,017 ... 0,025	0,017 ... 0,025	0,017 ... 0,025
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	0,007 ... 0,012	0,007 ... 0,012	0,007 ... 0,012
Resistencia a los agentes químicos	Excepcional	Excepcional	Excepcional

Loza electrotécnica

Su composición es muy parecida a la de la porcelana, excepto que, en lugar de caolín, se utiliza en su fabricación la arcilla cocida. Después de la cocción, puede esmaltarse exteriormente.

La loza electrotécnica resiste muy bien los efectos químicos y soporta sin inconveniente los cambios de temperatura, pero sus propiedades aislantes son inferiores a la de la porcelana.

Sus ventajas están en su menor coste y en la posibilidad de conseguir piezas de mayor tamaño que con la porcelana.

Generalmente, se emplean en baja tensión para la fabricación de placas de base y, en alta tensión como envolvente de protección en pasamuros al aire libre, en transformadores de medida, etc. es decir, en los casos en que no existen elevadas solicitaciones eléctricas, reservándose, sobre todo, para proteger de las influencias atmosféricas los elementos de mayor valor aislante como, por ejemplo, el papel prensado.

Esteatita

La *esteatita* está constituida, principalmente, por talco o silicato magnésico natural, en proporciones variables entre 70 y 90 %. La fórmula aproximada del talco es

$$3\ Mg\ O - 4\ Si\ O_2 - H_2\ O$$

Al talco, y según las características que se pretenda alcanzar en los productos acabados, se añaden diversas sustancias, generalmente óxidos de magnesio, de hierro, de titanio, etc.

El material en bruto, finamente molido, se mezcla con agua, para formar una pasta fácil de moldear de la cual, a torno, se hacen los aisladores u otros objetos. En seco, esta masa puede ser prensada. Por cocción, la esteatita se convierte en una masa compacta, constituida por cristales de silicato de magnesio, íntimamente ligados, cuyos intervalos están ocupados por la sustancia de relleno. Durante la cocción, las piezas de esteatita no sufren contracciones de volumen. La adición de pequeñas cantidades de óxidos de hierro, da a la esteatita un color gris o castaño, sin que, por otra parte, estos agregados tengan ninguna influencia sobre sus propiedades. Las propiedades eléctricas de la esteatita pueden mejorarse aumentando el contenido de óxido de magnesio, pero con ello se reduce la facilidad para la manipulación de la masa.

Tiene el inconveniente de que no se deja esmaltar pues, a consecuencia de la diferencia de coeficiente de dilatación, el esmalte se resquebraja y termina desprendiéndose.

La esteatita se emplea cuando los aisladores u otros objetos fabricados con este material, deban soportar grandes esfuerzos mecánicos, ya que sus resistencias a la tracción, a la compresión y a la flexión tienen, aproximadamente, un valor doble a las correspondientes a la porcelana. Las propiedades dieléctricas de la esteatita son también mejores que las de la porcelana, especialmente, su pequeño factor de

TABLA 24. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA ESTEATITA

Características	Calidad	
	Normal	Especial
Estructura	Compacta	Compacta
Porosidad	0	0
Absorción de agua en 24 horas, en %	0	0
Peso específico en gr/cm³	2,6 ... 2,8	2,6 ... 2,8
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	550 ... 850	550 ... 950
Resistencia a la compresión, en kg/cm²	8 500 ... 9 500	9 000 ... 10 000
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	1 200 ... 1 400	1 400 ... 1 600
Temperatura de reblandecimiento, en °C	~ 1 400	~ 1 400
Temperatura máxima de servicio, en °C	1 000	1 000
Resistencia a la llama	Incombustible	Incombustible
Resistividad a 20 °C, en ohmios · cm²/cm	Superior a 10^{13}	Superior a 10^{14}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 50 Hz	20 ... 30	35 ... 45
Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 1 MHz	[illegible]	25 ... 27
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	5,5 ... 6,5	5,5 ... 6,5
Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	5,5 ... 6,5	5,5 ... 6,5
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,0025 ... 0,0030	0,0010 ... 0,0015
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	0,0015 ... 0,0020	0,0003 ... 0,0005
Resistencia a los agentes químicos	Excepcional	Excepcional

pérdidas dieléctricas, incluso a altas frecuencia, la hace muy apropiada para la fabricación de objetos aislantes para telecomunicación, electrónica, etc.

Para la aplicación de la esteatita a los condensadores, por adición de pequeñas cantidades de óxido de titanio, han podido obtenerse materiales cerámicos cuya constante dieléctric. es 80 (recuérdese que, para la porcelana ordinaria, el valor de esta constante está comprendido entre 5 y 6,5).

El principal inconveniente de la esteatita es su alto coste, que limita su empleo a pequeñas piezas aislantes o a los casos en que se necesitan excepcionales condiciones de resistencia mecánica, bajo factor de pérdidas, etc.

Algunas denominaciones comerciales: *Isolantite, Lava, Lava Rock, Lavita, Al Si Mg,* etc.

En la tabla 24 se expresan las más interesantes características de dos tipos de esteatita denominados, respectivamente, normal y especial; este último, con bajas pérdidas dieléctricas, especial para aplicaciones en alta frecuencia.

Materiales cerámicos a base de compuestos de titanio

Estos materiales cerámicos están incluidos en el Grupo III, citado en un parágrafo anterior. Se caracterizan, sobre todo, por una constante dieléctrica elevada, unido a un pequeño factor de pérdidas dieléctricas, incluso a muy altas frecuencias, por lo que resultan muy adecuados para el aislamiento de condensadores, especialmente en frecuencias elevadas.

El principal constituyente de este grupo es el *óxido de titanio* (*rutilo*, en su forma mineral), que tiene una constante dieléctrica media igual a 117, valor que se conserva hasta las frecuencias ultraelevadas de 3×10^6 MHz. Pero, debido a su elevado precio y difícil obtención, el óxido de titanio puro solamente se emplea en casos muy especiales. Normalmente, se utilizan compuestos cerámicos cuyo componente básico es el óxido de titanio; la cocción produce su transformación en una sustancia cristalina, con una constante dieléctrica que llega hasta 90, con factor de pérdidas muy pequeño para alta frecuencia; por el contrario, para frecuencias bajas y media, el factor de pérdidas es más elevado, lo que limita sus aplicaciones a los campos de la alta frecuencia.

También se incluyen en este grupo, los materiales cerámicos que contienen *titanato de magnesio* que se caracterizan por una constante dieléctrica media (de 12 a 16) pero un factor de pérdidas extraordinariamente pequeño para altas frecuencias.

TABLA 25 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES CERÁMICOS A BASE DE COMPUESTOS DE TITANIO

Características	Nombres comerciales			
	Rosalt 90 Kerafar R y S Condensa	Rosalt 35 Kerafar T y U Condensa	Rosalt 15 Kerafar V Temipa	Rosalt 4
Peso específico en gr/cm³	3,5 ... 3,9	3,5 ... 3,9	3,1 ... 3,6	4 ... 5
Resistividad, en ohmios. cm²/cm : a 100 °C	10^{11} ... 10^{12}	10^{10}	10^{11} ... 10^{12}	10^{10} ... 10^{11}
Resistividad, en ohmios. cm²/cm : a 300 °C	10^{8} ... 10^{9}	10^{7} ... 10^{8}	10^{10} ... 10^{11}	10^{9}
Resistividad, en ohmios. cm²/cm : a 600 °C	10^{7} ... 10^{8}	10^{5} ... 10^{6}	10^{7} ... 10^{8}	10^{6} ... 10^{7}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	10 ... 20	10 ... 20	10 ... 20	—
Constante dieléctrica ε (50 Hz a 1 MHz)	80 ... 90	30 ... 50	10 ... 20	32 ... 40
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz : 60 °C	—	—	—	—
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 M Hz : 60 °C	0,0003 ... 0,0008	0,0003 ... 0,0023	0,0001 ... 0,0003	0,0001 ... 0,0003
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 M Hz : 80 °C	0,0003 ... 0,0008	0,0003 ... 0,0024	0,0001 ... 0,0003	0,0002 ... 0,0004
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 M Hz : 100 °C	0,0003 ... 0,0008	0,0003 ... 0,0026	0,0002 ... 0,0005	0,0002 ... 0,0005
Temperatura de reblandecimiento, en °C	~ 1 500	~ 1 500	~ 1 600	~ 1 700

Todos los materiales cerámicos a base de compuestos de titanio, son de estructura compacta y se conocen con diversas denominaciones comerciales. En la tabla de la página anterior se expresan las más importantes características de algunos de estos productos, con los correspondientes nombres comerciales.

Materiales cerámicos de reducido coeficiente de dilatación

Estos materiales cerámicos están incluidos en el grupo IV, al que nos hemos referido en un parágrafo anterior. Tienen estructura compacta, gran resistencia a las variaciones bruscas de temperatura y conservan sus propiedades dieléctricas, incluso a altas temperaturas, se emplean sobre todo, para protecciones aislantes contra arcos de chispa y luminosos. Pueden clasificarse en tres subgrupos:

1. Productos con gran contenido de compuestos de aluminio.

Entre éstos se pueden citar:

a) *Sinterkorund o corindón vitrificado*, aislante cerámico refractario que presenta una gran resistencia mecánica y buenas propiedades dieléctricas a altas temperaturas. Este compuesto es un óxido de aluminio fundido (99,2 % de alúmina y 0,8 % de sílice) y tiene el aspecto de un cuerpo completamente cristalizado, muy parecido exteriormente a la porcelana aunque su estructura y propiedades sean completamente distintas.

Como el corindón vitrificado es un cuerpo completamente cristalino y no tiene ninguna componente vítrea o amorfa, conserva todas sus propiedades mecánicas y eléctricas a altas temperaturas. Su resistencia a las variaciones bruscas de temperatura es tal, que se puede templar en agua fría el corindón vitrificado calentado al rojo, sin ningún inconveniente.

Se emplea este material cerámico, muy ventajosamente, en la fabricación de bujías de encendido para vehículos automóviles y en todas las aplicaciones en que se requieran aislamientos que remitan altas temperaturas de servicio. De forma especial, se emplea para fabricar soportes de resistencias para soldadores eléctricos, que pueden sufrir golpes con la resistencia incandescente, sin que el soporte de sinterkorund sufra ningún daño. También se emplea en la construcción de hornos eléctricos.

b) *Isomar*. Este material es un silicato de aluminio con bastante alúmina y sin que contenga mezcla de silicato magnésico. Las propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas son muy superiores a las de la

porcelana. Tiene aplicaciones análogas a las del corindón vitrificado, anteriormente reseñado.

c) *Piranita*. Contiene silicato de aluminio y silimanita. Exteriormente se parece a la porcelana. Resiste mejor los cambios bruscos de temperatura que los aislantes a base de esteatita y tiene análogas propiedades dieléctricas que esta última.

d) *Masa de Pitágoras*. Este material cerámico tiene gran resistencia al calor y a los cambios de temperatura. Funde a unos 1 800° C, y su empleo da excelentes resultados en atmósferas muy reductoras. Es insensible a los agentes químicos y sus masas son impermeables en vacío hasta 1 580° C. Algunos compuestos especiales resisten incluso el contacto de los metales en fusión. Se emplea en la fabricación de vainas para pirómetros, en tubos de caldeo y combustión y en crisoles que deban resistir temperaturas de hasta 1 700° C.

e) *Pirodur*. Es de color blanco y se emplea en aplicaciones de laboratorio, tales como cubetas y vainas para pirómetros cuyas temperaturas de servicio estén comprendidas entre 1 100° C y 1 500° C.

2. Productos con gran contenido de silicato magnésico. Los materiales básicos de composición son hidrosilicatos de magnesio (talco, esteatita, brucita, etc.). Estos productos reciben las denominaciones comerciales de *Calita*, *Calan*, *Ultracalan*, *Frecuenta* y *Frecuenta D*, entre otros. Todos ellos tienen estructura cristalina.

Los productos de este subgrupo están caracterizados por su pequeño factor de pérdidas dieléctricas, gran resistencia a los choques y excelentes cualidades dieléctricas a elevadas temperaturas y altas frecuencias. Los objetos de forma especial pueden obtenerse con gran precisión, ya que estos productos pueden tornearse, moldearse y estirarse antes de la cocción, la cual se realiza a unos 1 400° C. Después de la cocción pueden rectificarse y pulimentarse y las piezas resultantes pueden calibrarse en el torno con una precisión de ± 3 %.

El factor de pérdidas dieléctrico disminuye si aumenta la frecuencia, lo que les hace muy apropiados para aplicaciones en alta frecuencia. Estos productos son completamente insensibles a la acción del calor y de la humedad y no experimentan ningún fenómeno de envejecimiento o de fatiga. Además, en el horno pueden recubrirse con una capa metálica superficial, por electrólisis o por proyección, pudiéndose de esta forma efectuar soldaduras eléctricas.

Se utilizan en la técnica de las altas frecuencias para aislamiento de partes bajo tensión, para aplicaciones de electromedicina y como dieléctricos de condensadores. También encuentran aplicación en las partes aislantes que hayan de tener gran resistencia mecánica, en instalaciones de alta y de baja frecuencia, especialmente en electrotermia, a causa de su escasa conductibilidad a elevada temperatura (por ejemplo, en aislamiento de resistencias, hornos eléctricos, etc.).

TABLA 26. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES CERÁMICOS DE REDUCIDO COEFICIENTE DE DILATACIÓN

Características	Materiales con gran contenido de compuestos de aluminio			Materiales con gran contenido de compuestos de magnesio			Materiales con mezcla de compuestos de aluminio y magnesio		
	Sinterkorund	Isomar	Pirodur	Calita	Calan	Ultracalan	Frecuenta D	Ardostan	Sipa
Peso específico, en gr/cm³	3,78	2,7	2,6	2,6	2,8	2,7 ... 2,8	2,7	2,2	2,2
Resistencia a la compresión en kg/cm²	6 000	8 000	6 500 ... 8 500	10 000	5 000 ... 6 000	5 000 ... 6 000	9 000	3 000 ... 4 000	3 000 ... 5 000
Resistencia a la tracción en kg/cm²	950	600	300	600 ... 950	500	500	500 ... 850	350	300
Resistencia a la flexión en kg/cm²	1 200	1 750	1 300	1 500	1 000	1 600	1 500	850	1 500
Resistividad en ohmios, cm²/cm a 300 °C	12×10^{9}	40×10^{9}	32×10^{9}	32×10^{9}	26×10^{9}	—	25×10^{9}	$80 > 10^{9}$	6×10^{9}
Resistividad en ohmios, cm²/cm a 600 °C	19×10^{9}	33×10^{9}	—	32×10^{9}	—	630×10^{9}	41×10^{9}	$0,23 \times 10^{9}$	$0,024 \times 10^{9}$
Rigidez dieléctrica en kV/mm	12	40	25 ... 30	35 ... 45	35 ... 45	35 ... 45	27	20	20
Factor de pérdidas (tg δ) a 1 MHz	—	—	—	0,038	0,032	0,010	0,038	—	—
Factor de pérdidas (tg δ) a 50 MHz	—	—	—	0,032	0,025	0,010	0,019	—	—
Temperatura de reblandecimiento en °C	(1 730)	1 520	1 645	1 140	1 100	1 580	1 440	1 300	1 400

3. Productos con mezcla de compuestos de aluminio y de magnesio. Estos productos contienen esencialmente tres componentes principales: óxido de magnesio, alúmina y óxido de aluminio (sílice). Combinando adecuadamente estas sustancias, se obtienen materiales caracterizados por su pequeño coeficiente de dilatación cúbica.

Se conocen con los nombres comerciales de *Ardostan*, *Sipa*, etc. y son, generalmente, de color gris.

Tienen gran resistencia al arco eléctrico. Estas piezas no se pueden esmaltar, pero se les puede dar una superficie muy lisa, mediante una cocción especial.

Se emplean, tanto en alta como en baja tensión, en los puntos que están sometidos a variaciones bruscas de temperatura tales como soportes para conductores de hornos eléctricos, pantallas aislantes protectoras contra arcos y chispas y, además, en todos aquellos casos en que piezas sometidas a altas tensiones, deban ser impermeables a la humedad.

En la tabla 26 se expresan las más importantes características de algunos de los materiales cerámicos estudiados en el presente parágrafo.

Materiales cerámicos porosos

Los materiales cerámicos comprendidos en el Grupo V (definido en un parágrafo anterior) están constituidos por pastas porosas con diversos agregados de relleno que contienen arcilla y compuestos de magnesio. Tienen buena resistencia mecánica y gran resistencia al calor y a los cambios de temperatura, propiedad esta última que se encuentra favorecida por la estructura porosa y granular de estos materiales. Conservan sus propiedades dieléctricas incluso a altas temperaturas. Debido a su estructura porosa, absorben la humedad, perdiendo en parte sus propiedades eléctricas por lo que, si deben emplearse a la intemperie han de estar recubiertos de otros materiales aislantes no porosos.

Se emplean, sobre todo, en calefacción eléctrica y otras aplicaciones electrotérmicas donde sirven, a la vez, de soportes y de aislamiento de los conductores incandescentes.

Por su composición, pueden dividirse en tres subgrupos:

1) Materiales ternarios. Constituidos a base de óxido de magnesio, alúmina y sílice. Comprenden una serie de pastas que varían desde las muy porosas hasta las casi impermeables. Se conocen con los nombres comerciales de *Magnesolita*, *Termisol*, *Ost*, *Elwa*, *StG*, etc.

La composición y propiedades de estos compuestos, son intermedias entre las del gres y las de la esteatita. Las piezas grandes se preparan a partir de productos muy porosos y se utilizan como placas de calefacción, soportes, etc., las piezas más pequeñas se fabrican por prensado o por estirado.

2) Materiales con gran proporción de alúmina. Estos materiales son más refractarios que los anteriores. A veces se les añade corindón o carborundo para elevar su punto de reblandecimiento o para mejorar sus propiedades térmicas. Entre estos productos se pueden citar los siguientes:

Reostita. Contiene corindón y se emplea para la fabricación de tubos-soporte, paredes, etc., para fijación de conductores de calefacción de gran sección. Solamente pueden obtenerse piezas sencillas.

Q-5. Es un material muy poco poroso, con gran contenido de alúmina y muy poco fundente. Resiste muy altas temperaturas, ya que su temperatura de reblandecimiento es de unos 1 700° C.

Calodur. Este material contiene corindón y carborundo. Tiene buena conductibilidad térmica y resiste perfectamente los cambios bruscos de temperatura. Se utiliza para resistencias de calefacción cuyos conductores (hilos o pletinas) forman cuerpo con la masa cerámica; de esta forma pueden fabricarse placas o tubos de calefacción de grandes dimensiones. También se emplea este material como aislamiento de hornos eléctricos que alcanzan temperaturas hasta 1 000 grados centígrados.

3) Materiales varios. Muchos materiales cerámicos están compuestos de materiales varios, tales como la sílice, la bauxita, el zirconio, la magnesita, etc.

Estos productos se conocen con diversas denominaciones comerciales: *Aloska, Pirolita, Silocarbina, Morganita, Globar*, etc.

Como ejemplo, citaremos que la llamada *Masa de Marquardt* está constituida de la siguiente forma

Alúmina	66 %
Sílice	32,5 %
Alcalis	1,5 %
Impurezas	0,1 %

TABLA 27. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES CERÁMICOS POROSOS

Características	Materiales ternarios (Magnesolita)				Materiales con gran contenido de compuestos de aluminio		
	St-G	Elva	Ost	Termisol	Q-5	Reostita	Calodur
Porosidad, en %	30	23	10 ... 15	35	17	20	25
Peso específico, en gr/cm³	1,05	1,8	1,9	1,7	1,9	2,3	2,4
Resistencia a la compresión, en kg/cm²	500	2 000	2 000	1 000	1 000	650	650
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	90	150	150	100	150	120	110
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	160	350	300	300	350	330	320
Resistividad, en ohmios, cm²/cm a 300 °C	25×10^7	40×10^7	40×10^7	18×10^8	40×10^7	40×10^6	74×10^7
Resistividad, en ohmios, cm/cm a 500 °C	3×10^6	4×10^6	4×10^6	13×10^6	4×10^6	6×10^5	—
Temperatura de reblandecimiento, en °C	1 430	1 430	1 500	1 300	1 700	1 650	1 700

Se obtiene enriqueciendo el caolín con alúmina pura. Es refractaria, y los tubos fabricados con este material resisten hasta 1 600° C en disposición vertical, y hasta 1 500° C en disposición horizontal.

En la tabla 27 se indican las más interesantes propiedades de algunos de los materiales cerámicos porosos.

6 Materiales aislantes a base de vidrio

Definición y características generales

En general, se denomina *vidrio* a un material amorfo, duro, frágil, generalmente transparente o translúcido y constituido por mezclas homogéneas de sílice ($Si\ O_2$) o anhídrido bórico ($B_2\ O_3$) que actúan como ácidos, con dos óxidos metálicos por lo menos que actúan como bases. Las masas vítreas pueden contener además otras sustancias, como por ejemplo, partículas metálicas. Desde el punto de vista físico-químico, el vidrio es muy difícil de definir, ya que está totalmente exento de cristalización y no puede considerarse ni como sustancia sólida ni como líquida. Algunas veces han sido considerados como "fluidos sólidos" de extremada viscosidad a la temperatura ambiente, ya que algunas de sus propiedades son las de los fluidos aunque tengan el aspecto y la consistencia de los sólidos. Esta hipótesis parece confirmarse por el hecho de que en los vidrios no existe límite definido entre el estado sólido y el estado líquido; es decir, una temperatura o estado crítico en que parte del material comience a solidificarse al enfriarse desde el estado líquido o a fundirse al calentarse desde el estado sólido. Por el contrario, al aumentar la temperatura, la totalidad de la masa aumenta también su fluidez progresivamente, hasta que, a temperaturas generalmente muy elevadas, toda la masa se convierte en un verdadero líquido.

La composición de un vidrio se expresa indicando la proporción en peso de los óxidos que lo componen, comenzando por la sílice ($Si\ O_2$) y el anhídrico bórico ($B_2\ O_3$), que se consideran los elementos

vitrificantes propiamente dichos por su tendencia a solidificar cuando se encuentran en estado vidrioso; esta propiedad se hace extensiva a sus sales y mezclas de sus sales.

Además de los citados, los princi. les óxidos metálicos que entran en la composición del vidrio son los siguientes: alumínico (Al_2O_3), sódico (Na_2O), potásico (K_2O), magnésico (MgO), cálcico (CaO), ferroso-férrico (Fe_2O_3), bárico (BaO) y plúmbico (PbO).

Como ejemplo de composición de vidrios, a continuación se citan dos de ellos:

Flint glass: 56 % de B_2O_3, 32 % de PbO, 12 % de Al_2O_3

Crown glass: 65,3 % de SiO_2, 15 % de B_2O_3, 12 % de K_2O, 4,2 % de Al_2O_3, 3,5 % de As_2O_3

En estado ordinario, el vidrio es un cuerpo sólido, de brillo característico (brillo vítreo); al romperse, presenta fractura concoidea, especialmente apreciable en piezas de cierto espesor. Generalmente es transparente pero ésta no es una propiedad esencial del vidrio, ya que también existen vidrios translúcidos e, incluso, opacos, aun en pequeños espesores. Ablandado por el calor, adquiere tenacidad y puede moldearse en cualquier forma imaginable, suelda al rojo vivo. A temperaturas más bajas es plástico y admite ser cortado con tijeras y cuchillas; en frío es duro y, por lo general muy quebradizo. El vidrio fundido puede transformarse fácilmente en fibras largas de varios centenares de metros de longitud *(fibra de vidrio)*, que conservan suficiente flexibilidad para ser transformadas en *tejido de vidrio*. En Electrotecnia se emplean tanto el vidrio moldeado como la fibra y el tejido de vidrio.

Las propiedades mecánicas del vidrio están muy influenciadas por su fragilidad, que es su principal desventaja. Esta fragilidad es debida a que, durante su deformación, el vidrio no tiene zona plástica por lo que se rompe cuando se rebasa su límite de elasticidad. Esta circunstancia hace que, en todos los casos, se debe hacer trabajar al vidrio muy por debajo de su límite de elasticidad.

En lo que se refiere a sus propiedades químicas, el vidrio es extraordinariamente estable y tiene excelente resistencia a la mayor parte de los compuestos químicos conocidos. Unicamente es atacado por el ácido fluorhídrico, que lo descompone formando fluoruros de silicio de naturaleza gaseosa.

Los agentes atmosféricos (oxígeno y ozono) y las radiaciones ultravioletas atacan al vidrio pero muy lentamente.

Uno de los inconvenientes que limita el empleo del vidrio en Electrotecnia es su elevado coeficiente de dilatación, por lo que

resulta bastante afectado en sus dimensiones por los cambios de temperatura.

Los vidrios solamente se funden a temperaturas muy elevadas, son muy poco higroscópicos y no tienen porosidad. Las hendiduras y defectos interiores que puedan tener, son visibles a simple vista.

La fabricación del vidrio consiste, esencialmente, en la producción de mezclas adecuadas de silicatos hasta la fusión (a unos 1 400° C); para ello, se disponen conjuntamente en crisoles de cristal, colocados en hornos especiales, las sustancias constitutivas (por ejemplo, arena, sosa, sulfato de sodio, carbón, cal, arcilla). En algunos hornos, estos mismos componentes constituyen el crisol, desapareciendo este accesorio.

El vidrio puede trabajarse por esmerilado, por colada, por prensado y por sopladura.

Clasificación de los vidrios

Para determinar las posibles aplicaciones de los vidrios en Electrotecnia, resulta necesario intentar una clasificación. Lo más racional es efectuar esta clasificación, desde el punto de vista de los componentes principales que constituye cada clase de vidrio. Siguiendo este criterio, los vidrios se pueden clasificar como sigue:

1. Vidrios que solamente utilizan la sílice como material vitrificante:

   a) Vidrios de sodio y calcio (crown glass)
   b) Vidrios de sodio, calcio y aluminio
   c) Vidrios de potasio y calcio
   d) Vidrios de potasio y plomo (flint glass)

2. Vidrios que utilizan conjuntamente la sílice y otros materiales como vitrificantes:

   a) Vidrios de boro y sílice
   b) Vidrios de fósforo y sílice

3. Vidrios que no utilizan la sílice como vitrificante:

   a) Vidrios de boro
   b) Vidrios de plomo

4. Vidrios de sílice y álcali (vidrios solubles en el agua).

5. Vidrio de cuarzo, constituido por sílice pura.

Casi todos los vidrios citados se emplean, de una forma u otra, en Electrotecnia estando determinadas sus aplicaciones por las propiedades mecánicas, eléctricas, ópticas y químicas de cada clase de vidrio. Por ejemplo, para las ampollas de las lámparas de vapor de mercurio o de sodio debe emplearse un vidrio que tenga una temperatura de servicio de 600° C y que soporte la acción de los vapores metálicos, además ha de ser transparente a las radiaciones ultravioletas; todas estas características las reúne el vidrio de cuarzo que será, por tanto, el material más apropiado para esta determinada aplicación. Los vidrios de boro y sílice, con elevado contenido de este último material, se emplean para fabricar los recipientes de los rectificadores de vapor de mercurio. En las ampollas que han de contener metales embebidos por fusión, como sucede en las lámparas de incandescencia, válvulas termoiónicas, etc., debe emplearse un vidrio cuyo coeficiente de dilatación sea lo más semejante posible al del metal embebido.

Puede apreciar el lector que el campo de utilización de los vidrios en Electrotecnia es muy amplio y que resulta muy difícil un estudio sistemático de todas sus posibles aplicaciones. En lo que sigue, haremos referencia, sobre todo, a su empleo como material aislante y, por lo tanto, se estudiará de una manera especial sus propiedades dieléctricas.

Propiedades dieléctricas de los vidrios empleados en Electrotecnia

El vidrio es un excelente aislante eléctrico. Tiene alta resistividad y rigidez dieléctrica a temperaturas ordinarias y pequeño factor de pérdidas dieléctricas. Pero, con la elevación de temperatura, desmerecen en parte estas propiedades, ya que aumenta el factor de pérdidas y, por otra parte, disminuye la rigidez dieléctrica.

En la figura 47 puede apreciarse la variación de la rigidez dieléctrica del vidrio, en función del espesor, para distintas variedades de vidrio.

Como se ha dicho anteriormente, el factor de pérdidas dieléctricas aumenta con la temperatura; pero, a temperatura constante, este factor apenas varía con la frecuencia, por lo que el vidrio puede utilizarse en toda la gama de frecuencias comprendida entre 50 Hz y 1 MHz. En la figura 48 se aprecia la variación del factor de pér-

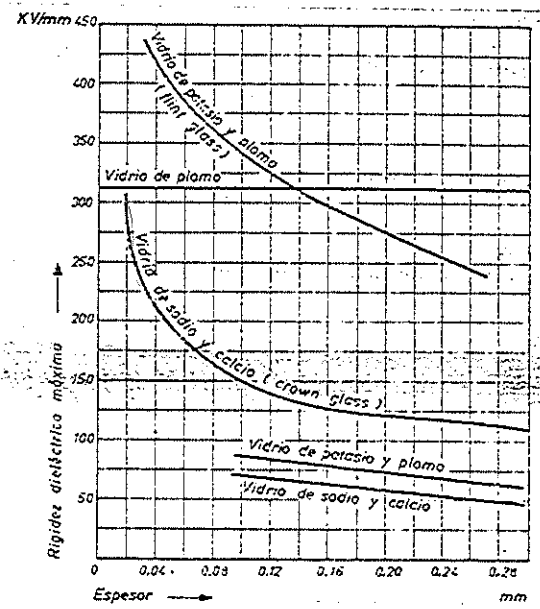


Fig. 47.—Variación de la rigidez dieléctrica de diversas clases de vidrios, en función del espesor.

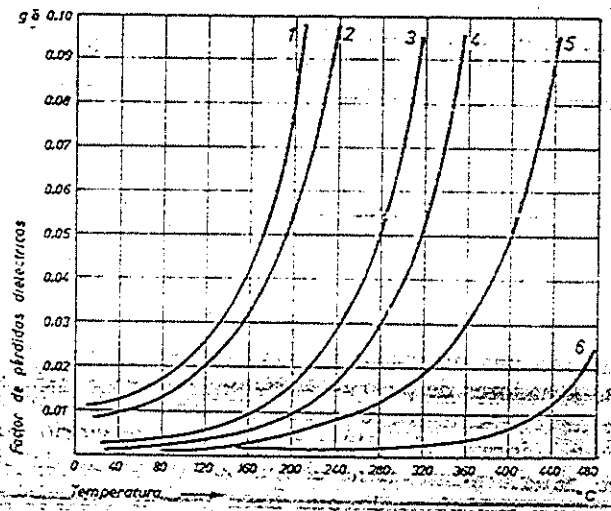


Fig. 48.—Variación del factor de pérdidas dieléctricas de diversas clases de vidrios, en función de la temperatura. 1—Vidrio de sodio y calcio. 2—Vidrio de potasio y plomo. 3, 4, 5—Vidrios electrotécnicos. 6—Cuarzo fundido.

didas a 1 MHz, en función de la temperatura, para varias clases de vidrio.

Aplicaciones del vidrio electrotécnico

Según la composición del vidrio, se le utiliza como material aislante para diferentes aplicaciones; a continuación, se exponen algunas de estas aplicaciones.

En la fabricación de aisladores para líneas aéreas se emplea el *vidrio Pyrex* o *vidrio duro*, que contiene boro y sílice pero no magnesio, calcio ni zinc y que resulta menos frágil que los vidrios ordinarios. Con vidrio de esta clase, se construyen aisladores de apoyo para líneas de transporte y tensiones de servicio hasta 70 kV. Como el coeficiente de dilatación térmica de este tipo de vidrio es relativamente bajo, dicho material tiene excelente resistencia a los arcos y chispas. Por otra parte, el vapor de agua tiende a depositarse sobre la superficie del vidrio, con la consiguiente reducción del valor de la resistividad para humedades relativas superiores al 70 %; este inconveniente se subsana actualmente mediante el tratamiento de la superficie del vidrio con resinas de silicona, que repelen la humedad. Este material tiene color verde oscuro característico. Aunque es un material más barato que la porcelana, su coeficiente de dilatación es mayor que el de este último material por lo que, comparativamente, resulta más afectado por la temperatura. Además, y siempre en comparación con la porcelana, no se le puede trabajar en formas complicadas y la unión al soporte debe realizarse por procedimientos especiales.

Las técnicas recientes en la fabricación del vidrio permiten los recubrimientos metálicos al fuego sobre el vidrio, lo que permite su aplicación para conexiones soldadas. Variando adecuadamente la composición del vidrio, puede dársele un coeficiente de dilatación igual al de ciertos metales y obtener, de esta forma soldaduras que no son afectadas por los cambios bruscos de temperatura. Estos vidrios han tenido una aplicación especialmente importante en la fabricación de aisladores de paso totalmente estancos, por su facilidad en soldarse directamente con el metal del soporte. Las piezas metálicas se montan durante el moldeo del aislador de vidrio que, como se ha dicho anteriormente, tiene el mismo coeficiente de dilatación que el metal de soldadura, lo que hace posible ésta. Se emplean principalmente tres combinaciones de vidrio y de metal:

1. Aleación de hierro y níquel con 42 % de níquel, asociada con un vidrio especial de borosilicato de plomo.

2. Aleación de hierro y cromo con 26 % de cromo y vidrio especial al plomo; el interés de esta combinación está en que es inoxidable, ventaja muy importante para manguitos que hayan de instalarse a la intemperie.
3. Hierro con vidrio al plomo. Aunque esta combinación resulta tan eficaz como las anteriores, tiene las ventajas de su baratura y de que los manguitos pueden moldearse directamente sobre las partes metálicas de que se trate.

Para la obtención de manguitos de gran tamaño, directamente moldeados, se funde el vidrio en un horno eléctrico, desde donde pasa a un molde. Para los manguitos de pequeñas dimensiones el vidrio frío se coloca en el molde, con sus partes metálicas ya montadas, y se calienta durante 5 minutos a una temperatura de unos 900° C.

La firma Corning Glass Works ha desarrollado el *proceso multiforme* para la fabricación de vidrio electrotécnico. Mediante este proceso, el vidrio es pulverizado, prensado para darle forma y cocido después como la porcelana, lo que hace posible la producción de piezas complicadas con tolerancias de 1 a 2 % y permite el empleo de vidrios de sílice de alta calidad, de muy bajas pérdidas y pequeño coeficiente de dilatación. Las piezas que se obtienen con este procedimiento, son opacas o translúcidas y ha permitido una ampliación de las posibilidades de aplicación del vidrio en la Electrotecnia.

El *vidrio Vycor* de la firma Corning Glass Works tiene propiedades comparables a las del cuarzo fundido, material del que se hablará más adelante. Es adecuado para su empleo en altas temperaturas ya que su punto de reblandecimiento está en los 1 500° C y la temperatura máxima de trabajo continuo, en los 800° C. Tiene también una elevada resistencia al arco eléctrico.

Cuarzo fundido

El *cuarzo* es una variedad de sílice que se presenta en la Naturaleza en forma de cristales hexagonales los cuales son, generalmente, incoloros y transparentes, aunque algunas veces se presentan coloreados. Este material puede fundir a 1 700° C, obteniéndose una masa limpia, translúcida y brillante, que constituye un aislante eléctrico de cualidades excepcionales y una resistencia al calor mayor que cualquier otro material conocido hasta el momento. Es químicamente muy estable, no absorbe el agua y no es atacado por los disolventes ni por los ácidos, excepto el ácido fluorhídrico; es atacado muy lentamente por los álcalis concentrados. Es mecánicamente muy

fuerte y muy resistente a las bruscas variaciones de temperatura, a causa de su pequeño coeficiente de dilatación.

Presenta, además, las siguientes ventajas:

a) se pueden preparar piezas de cualquier tamaño, y de estructura uniforme.
b) el proceso de elaboración implica solamente una operación de muy corta duración.
c) tanto el calentamiento como el enfriamiento, pueden efectuarse muy rápidamente.
d) no es necesario vitrificarlo, pues el material ya es completamente vítreo y no necesita esmalte de ninguna clase.
e) el calor de un arco, que se extienda sobre su superficie, no lo hace conductor ni lo astilla.
f) es totalmente antihigroscópico.
g) se le puede dar un espesor suficiente para hacerlo a prueba de perforaciones, para cualquier tensión eléctrica que se desee.
h) puede obtenerse en barras, bloques, tubos y otras formas.
i) puede esmerilarse y serrarse fácilmente con sierra circular, ya que no se agrieta con facilidad.

Tiene una temperatura máxima de servicio de unos 1 000° C, es decir, superior a cualquier otro material aislante. Para el servicio a altas temperaturas, debe ser mantenido puro, porque las trazas de soles metálicas hacen que disminuya su punto de fusión y pueda ser causa de la rotura de las piezas de cuarzo.

El cuarzo fundido se emplea, sobre todo, en la técnica de la alta frecuencia, por su gran resistividad y pequeño factor de pérdidas, en armazones de bobinas de autoinducción, transformadores, etc.

El principal inconveniente del cuarzo fundido es que resulta excesivamente caro, por lo que, en casi tod. sus aplicaciones, se le sustituye por la sílice fundida, obtenida por fusión de arena en un horno eléctrico y prensada posteriormente en moldes de grafito. Este material tiene propiedades semejantes a las del cuarzo fundido, aunque no es tan resistente a las altas temperaturas, a causa de contener trazos de sales metálicas.

Resumen de lo explicado

Como resumen de lo que se ha explicado hasta ahora, a continuación se expone una tabla de características de diversos vidrios utilizados en Electrotecnia así como del cuarzo fundido, que puede considerarse también como un material vítreo.

TABLA 28. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES. VÍTREOS

Características	Vidrio de sodio y calcio (crown glass)	Vidrio de potasio y plomo (flint glass)	Vidrio multiforme N.° 707	Vidrio pyrex	Vidrio vycor	Cuarzo fundido
Peso específico, en gr/cm³	2,3 ... 2,9	2,9 ... 5,9	2 ... 10	2,23 ... 2,8	2,18	2,2
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	175	250	—	400 ... 800	—	5
Resistencia a la compresión, en kg/cm²	700 ... 2 000	400 ... 700	—	6 000 ... 10 000	—	14 000 ... 19 000
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	—	400 ... 500	700	1 000 ... 2 500	—	—
Temperatura máxima de funcionamiento, en °C	300	450	500	500	800	1 000
Absorción de agua en 24 horas, en %	nula	nula	< 0,01	nula	nula	nula
Resistividad en ohmios, cm/cm	> 10^{13}	10^{13}	5 × 10^{14}	10^{14}	—	> 5 × 10^{14}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 20 °C	40 ... 50	30 ... 35	20 ... 25	40 ... 45	20 ... 25	12 ... 20
Constante dieléctrica ε	6 ... 8	7 ... 9	3,8 ... 4,7	4,8 ... 4,9	4	4,2
Factor de pérdidas (tg δ)	0,01	0,0042	0,0008	0,003	0,0005	0,0002

Esmalte vítreo

Para fabricar el *esmalte vítreo* se parte de un vidrio de borosilicato o silicato, cuyo punto de fusión ha sido rebajado por adición de varios fundentes (óxidos metálicos, sales, etc.). Algunos óxidos metálicos se emplean para colorear el esmalte y otros para aumentar su opacidad. Si se desean obtener superficies lisas, el esmalte debe emplearse en dos o más capas. Estas capas se aplican por inmersión o rociado, empleando una sustancia arcillosa y agua como vehículo; después de aplicadas, se recuecen hasta unos 850° C durante períodos de tres a treinta minutos. La temperatura y el tiempo de recocido, son críticos para un esmalte de determinada composición y las dimensiones del objeto que se debe esmaltar. Algunos esmaltes tienen excelentes propiedades dieléctricas e incluso pueden emplearse como dieléctricos de pequeños condensadores, pero su aplicación más frecuente es para la fabricación de resistencias esmaltadas o vitrificadas. Para esta aplicación especial debe estudiarse la fórmula de composición, con objetivo de que el coeficiente de dilatación sea el adecuado para el hilo y forma de las espiras, evitando la rotura del hilo por efecto de periódicos cambios de temperatura.

Fibra y tejido de vidrio

El vidrio estirado en finos filamentos o *fibras* tiene una extraordinaria resistencia a la tracción además de buenas propiedades dieléctricas. Por estas razones, el vidrio se emplea desde hace algunos años en aplicaciones electrotécnicas, bien sea hilado *(fibras de vidrio)* o tejido *(tejido de vidrio)*.

Para la producción económica de fibras de vidrio se han ideado varios procedimientos. En todos los casos, se emplea un vidrio especial, libre de sustancias alcalinas e insoluble en el agua. De esta forma, se pueden producir dos tipos de fibras:

a) *fibras en hebras*, con una longitud comprendida entre 10 y 30 cm, que se fabrican dejando pasar vidrio fundido a través de pequeños orificios, en combinación con vapor a presión.
b) *fibras continuas*, de gran longitud en las que se parte de vidrio fundido, que se pasa por una serie de agujeros finos practicados en un bloque de metal de alto punto de fusión, de donde sale en forma de hilos. Para disminuir el espesor de estos hilos, se estiran cuando están aún en caliente y en estado plástico. Después, se arrollan los hilos en un tambor que gira a gran velocidad, obteniéndose de esta forma las fibras continuas, de gran longitud.

Por ambos procedimientos, se obtienen fibras de diámetros comprendidos entre 0,0050 y 0,0075 mm, que pueden tejerse en cuyo caso, las telas hechas de fibras continuas, tienen mayor resistencia mecánica que las telas hechas de fibras en hebras.

La resistencia de la fibra de vidrio a la tracción y a la compresión, es muy elevada y, desde luego, muy superior a la de otras fibras textiles. Por el contrario, la resistencia al rozamiento resulta inferior a la del algodón; por esta causa, después de su aplicación a los conductores, la fibra de vidrio se recubre con barnices especiales que dan a este material, una resistencia al rozamiento equivalente a la del algodón.

La fibra de vidrio es ininflamable y de una extraordinaria resistencia al calor: su temperatura máxima de servicio está únicamente limitada por los productos de impregnación utilizados. No es higroscópica y resiste perfectamente a la humedad, a la corrosión, a los ácidos y a los aceites; únicamente es atacada por el ácido fluorhídrico y, en mucho menor grado, por los álcalis concentrados.

La fibra de vidrio es imputrescible, muy estable químicamente y sus propiedades mecánicas apenas sufren alteración hasta temperaturas de 500° C.

La fibra de vidrio es porosa y, desde el punto de vista eléctrico, solamente puede considerarse como material de relleno, a menos que esté impregnada por otros materiales aislantes.

Sus propiedades dieléctricas son excelentes; la rigidez dieléctrica es similar a la del algodón natural, mientras que su resistencia de aislamiento es más elevada que la de cualquier aislante textil.

La fibra de vidrio puede tejerse en forma de manguitos aislantes, convenientemente impregnados y utilizados como aislamiento de conductores, en forma de cintas, también con impregnación, y empleadas como aislamiento de bobinas y de fases y, finalmente, como tela, y entonces se aplica como material aislante de ranuras.

Hemos dicho anteriormente que la clase térmica de un material aislante a base de fibra de vidrio estaba determinada por el material de impregnación. De esta forma, se puede obtener un conjunto de materiales aislantes, de amplia aplicación en los bobinados de máquinas eléctricas y caracterizados todos ellos por su gran resistencia mecánica. La única condición técnica que se impone al empleo de este material es que los demás materiales aislantes que entren a formar parte del bobinado sean inorgánicos, es decir, que los aislantes entre bobinas, entre bobinas y hierro, etc., sean a base de fibra de vidrio, amianto, mica, etc., así como también que los barnices empleados en la impregnación final de los bobinados sean de naturaleza sintética, los cuales soportan temperaturas más elevadas que los bar-

nices grasos. A continuación, se citan los materiales de impregnación y las clases térmicas de los materiales aislantes que resultan:

Plásticos de melamina
" de fenol-formaldehído
" de fenol-furfural
" de poliester
" de epóxidos
Clase térmica B
(Temperatura 130° C)

Plásticos de epóxidos especiales — Clase térmica F (temp. 155° C).
Resinas de silicona — Clase térmica H (temp. 180° C).

Además, la fibra de vidrio puede utilizarse también en combinación con otras fibras, naturales o sintéticas, que mejoran algunas de sus propiedades. Por ejemplo, utilizando conjuntamente fibra de vidrio con fibra de poliester se obtiene un excelente aislamiento para conductores de máquinas eléctricas de características eléctricas y térmicas semejantes a los aislamientos de fibra de vidrio, pero de mejores propiedades mecánicas, sobre todo en lo que hace referencia a la resistencia al rozamiento. Se presenta sin barnizar o barnizada con barniz sintético obteniéndose aislamientos de clase térmica *F* (Temperatura máxima de trabajo, 155° C); si se emplea barniz de silicona, se obtiene un aislamiento de clase térmica *H* (temperatura máxima de trabajo, 180° C).

El campo de aplicación de los conductores aislados con fibra de vidrio, sola o en combinación con otras fibras (como la de poliester, por ejemplo), se extiende a todos los casos en que las máquinas eléctricas deban funcionar permanentemente a régimen de plena carga, tales como motores de tracción, motores de ascensores y montacargas, motores de laminadores, etc., así como para máquinas eléctricas sometidas a altas temperaturas ambientales: hornos, fundiciones, etc., o que deban funcionar en atmósferas corrosivas (fábricas de productos químicos, fábricas de cemento, etc.).

La fibra de vidrio también se utiliza como soporte de otros materiales aislantes, tales como mica, amianto, etc. Estas aplicaciones particulares se estudian en los capítulos correspondientes a los materiales citados.

Materiales estratificados a base de fibra de vidrio

Tal como su nombre indica, los materiales estratificados están constituidos por láminas superpuestas de un material base o soporte,

y de una resina que lo impregna, la cual actúa de aglutinante entre cada estrato o lámina, consiguiéndose una perfecta unión bajo presión y temperatura.

Con los materiales estratificados a base de fibra de vidrio se fabrican placas, tubos, barras, etc., y también en piezas moldeadas que son piezas muy utilizadas en diversas aplicaciones electrotécnicas. La clase térmica del material estratificado depende del material utilizado como aglutinante o aglomerante. Empleando como aglutinante una resina del tipo de fenolformor se obtiene un material de clase térmica *B* (120° C) con buenas propiedades mecánicas y eléctricas y excelente resistencia a los ácidos, aunque no muy buena a los álcalis. Este material no puede utilizarse como aislamiento primario, es decir, en inmediato contacto con conductores eléctricos, pero encuentra excelentes aplicaciones como aislante de ranuras, espaciadores y paneles en los que terminales y conductores tengan además aislamiento separado y, en general, en todas las aplicaciones en que se requieran alta resistencia mecánica y buenas propiedades eléctricas, incluso a altas temperaturas.

Si el aglutinante empleado es una resina de melamina-formol, se obtiene también un material estratificado de clase térmica *B*, pero de mejores propiedades mecánicas que el anterior. No es atacado por la llama ni por el calor. Sus propiedades eléctricas son muy buenas en estado seco, aunque su resistividad disminuye notablemente si se expone a una humedad elevada. Tiene gran estabilidad dimensional y soporta mejor la acción de los álcalis que los estratificados de fenolformol, aunque es menos resistente en la acción de los ácidos. Sus aplicaciones se derivan de su buena resistencia mecánica, al arco y a la llama, siendo particularmente utilizado en aplicaciones navales.

Los materiales estratificados a base de fibra de vidrio, que utilizan resinas epoxídicas como aglutinante, tienen una elevada resistencia mecánica, un reducido coeficiente de absorción de agua, excelente conductividad térmica, gran resistencia a la humedad y a los agentes atmosféricos y buenas propiedades dieléctricas, especialmente el factor de pérdidas, que es muy pequeño. Se consideran de clase térmica *B* y, por sus características específicas, es muy indicado en aplicaciones de alta tensión cuando haya que soportar importantes esfuerzos mecánicos. También se emplea en el aislamiento de ranuras de las máquinas eléctricas.

Utilizando como soporte la resina de poliester, se logra un material estratificado de clase térmica *F* (155° C), que tiene además una excelente resistencia a la humedad, es muy inerte químicamente, muy buen aislante térmico, y tiene excelentes propiedades mecánicas; sus propiedades eléctricas son excelentes, especialmente en lo que se re-

fiere a su factor de pérdidas, que es muy pequeño. Sus características lo hacen muy indicado donde se requiera un reducido coeficiente de absorción de la humedad y buena rigidez dieléctrica, como sucede, por ejemplo, en aplicaciones navales. También es recomendable para aplicaciones electrónicas, por su pequeño factor de pérdidas.

También pueden emplearse como aglutinante, las resinas de silicona, en cuyo caso se obtiene un material estratificado de clase *H* (180° C), que tiene muy buenas propiedades mecánicas y excelentes propiedades eléctricas, sobre todo en lo que hace referencia a su factor de pérdidas, que es muy pequeño. Destaca, sobre todo, su buena resistencia a las temperaturas elevadas, al arco eléctrico y a la llama. Tiene buena resistencia a la acción de la mayoría de ácidos diluidos, aunque no muy buena a los álcalis. No es muy resistente a la acción de los disolventes orgánicos, por lo cual, la operación de impregnación con barnices, de máquinas eléctricas en que se han utilizado materiales a base de siliconas, debe hacerse con la mayor rapidez posible. El empleo de este material estratificado se recomienda en todos los casos en que puedan aprovechar sus excelentes propiedades térmicas: máquinas sometidas a sobrecargas sistemáticas o arranques y paradas frecuentes, cuñas de cierre de máquinas eléctricas, placas de bornes, soportes aislantes, etc., y en aplicaciones electrónicas que deban funcionar en condiciones muy duras de temperatura; como placas soporte de válvulas, circuitos impresos, placas de bornes, etc.

Las placas estratificadas a base de tejido de vidrio, con una lámina conductora de cobre electrolítico en una o ambas caras tienen muy buenas características mecánicas y eléctricas y muy bajo coeficiente de absorción de agua; se emplean como circuitos impresos destinados, principalmente, al conexionado de circuitos electrónicos, televisores, transmisores, telefonía, equipos de radar, etc., en los que se precisen las características anteriormente reseñadas.

Zunchos de fibra de vidrio

En los bobinados retóricos de las máquinas eléctricas giratorias, se sujetan los conductores mediante zunchos de hilos de acero, ya que, al estar aquéllos sometidos a la acción de la fuerza centrífuga, se necesitan elementos de sujeción de gran resistencia mecánica.

En lugar de hilos de acero, actualmente se tiende al empleo de zunchos formados por cintas de fibra de vidrio, paralelos entre sí y sin trama, que se matienen unidos mediante impregnación con resina de poliéster, la cual se polimeriza por aplicación de calor, una vez aplicado el zuncho, constituyendo de esta forma un elemento de sujeción de los devanados sólido, compacto y de gran resistencia a

los esfuerzos desarrollados por la fuerza centrífuga. Los zunchos de fibra de vidrio tienen, sobre los zunchos de hilos de acero, las siguientes importantes ventajas:

a) alta resistencia a la tracción.
b) excelentes cualidades aislantes, lo que evita tener que colocar aislamientos intermedios, con el consiguiente ahorro de espacio.
c) no son magnéticos, con lo que se eliminan las pérdidas por inducción.
d) no hay riesgos de calentamiento.
e) pueden utilizarse en funcionamiento continuo con temperaturas comprendidas entre −20 y +150° C.
f) al polimerizar la resina de poliester de los zunchos experimenta una contracción, lo que hace que el zunchado sea más apretado.
g) son insensibles a la corrosión y, por lo tanto, adecuados para máquinas eléctricas que trabajen en atmósferas corrosivas.
h) mejor fijación en las cabezas de las bobinas, debido al pegado directo y a la colocación inmediatamente contigua al aislamiento.
i) considerable economía de tiempo durante la operación de zunchado, al suprimirse la soldadura y la fijación de los extremos, necesarios en los zunchados con hilos de acero.

Se pueden aplicar en todos los casos en que actualmente se emplean los zunchos de hilos de acero. Especialmente indicados en las máquinas eléctricas con motores de grandes diámetros y elevadas velocidades, generadores, motores de tracción, motores de laminadores, etc., así como en todos los motores con trabajo intensivo, tales como máquinas para obras públicas, minería, etc.

Los zunchos de fibra de vidrio se expenden en el comercio en cintas de 10, 20 y 30 mm, con espesor de unos 0,30 mm.

7 Materiales aislantes a base de mica

Variedades de mica empleadas en Electrotecnia

Se da el nombre general de *mica* a un grupo natural de silicatos de aluminio, cuya característica común es que pueden exfoliarse en láminas flexibles, resistentes y extraordinariamente delgadas; en el comercio, estas láminas se encuentran en espesores comprendidos entre 0,015 y 0,033 mm. Estas láminas u hojas se pueden emplear directamente, por ejemplo como dieléctrico de condensadores o, para otros usos, en forma de aislantes de mica preparados con laminillas o polvo de mica cementadas con diversos adhesivos, de los que se dará noticia más adelante.

Existen muchas variedades de mica, pero en Electrotecnia se emplean solamente dos de estas variedades:

1. La *mica moscovita* o mica de potasio que se encuentra, sobre todo, en la India y también en Estados Unidos, Africa y América del Sur. Esta variedad se presenta en tres coloraciones: blanca, rubí y verde, siendo la primera la más empleada, por sus superiores propiedades mecánicas y eléctricas. Por esta razón, a la mica moscovita se la conoce también con el nombre de *mica blanca*.
2. La *mica flogopita*, que se encuentra principalmente en Madagascar y Canadá, es de color ambarino y, por esta causa, también se la conoce con el nombre de *mica ambarina*. Está constituida por silicatos de aluminio y de magnesio.

Aunque las dos variedades de mica citadas tienen excelentes propiedades eléctricas, puede decirse que la mica moscovita es superior a las flogopitas en lo que se refiere a sus propiedades mecánicas y dieléctricas, aunque esta última tiene mejores propiedades térmicas. En Electrotecnia, más del 80 % de la mica utilizada es moscovita por lo que, mientras no se diga expresamente lo contrario, nos referiremos principalmente a esta variedad.

Propiedades generales de la mica

El peso específico de la mica varía entre 2,7 y 3 gr/cm³. A temperaturas comprendidas entre 600° C (mica moscovita) y 1 200° C (mica flogopita), la mica pierde su agua de composición y se disgrega.

Desde el punto de vista de la rigidez dieléctrica, la mica es el mejor de los materiales aislantes actualmente conocidos: para espesores de 0,01 mm, el valor de la rigidez dieléctrica puede alcanzar 500 kV/mm, que desciende hasta 50 kV/mm para muestras de 1 mm de espesor. La mica blanca o moscovita es mejor que la mica ambarina, desde este punto de vista. En la figura 49 puede apreciarse la variación de los valores de la rigidez dieléctrica en función del espesor del aislamiento para ambas variedades.

La constante dieléctrica varía entre 5 y 9, según la procedencia de la mica. Este valor varía con la frecuencia y la temperatura, siendo menor esta variación en la mica moscovita, como puede apreciarse en la figura 50 donde se expresa la variación en tanto por ciento de la constante dieléctrica de ambas variedades de mica, en función de la temperatura.

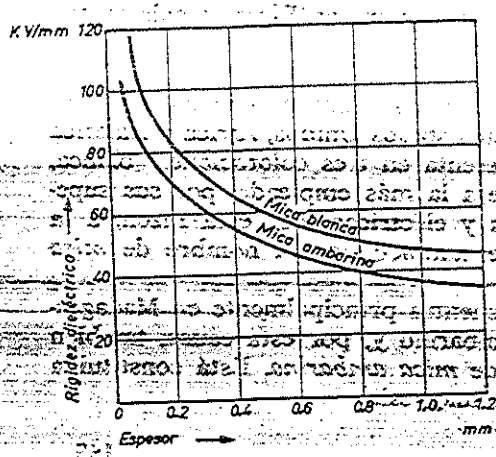


Fig. 49.—Variación de la rigidez dieléctrica en función del espesor, de las variedades de mica empleadas en Electrotecnia.

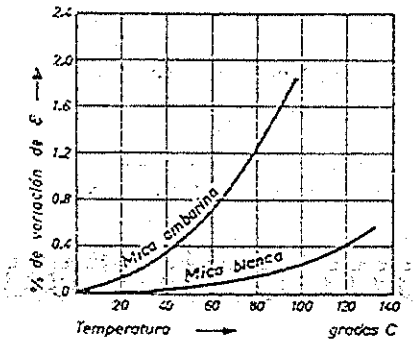


Fig. 50.—Variación de la constante dieléctrica en función de la temperatura, de las variedades de mica empleadas en Electrotecnia.

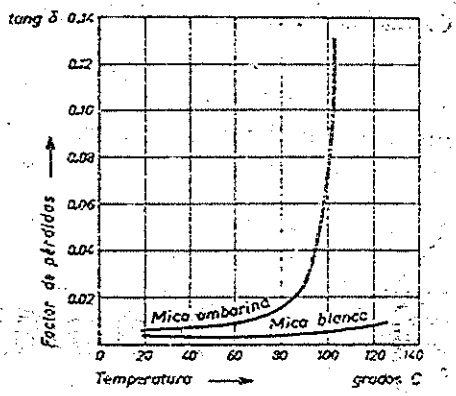


Fig. 51.—Variación del factor de pérdidas dieléctricas en función de la temperatura, de las variedades de mica empleadas en Electrotecnia.

El factor de pérdidas dieléctricas de la mica moscovita, varía entre 0,0001 y 0,0008 a 25° C y con frecuencias comprendidas entre 50 Hz y 1 MHz; la mica flogopita, entre los mismos límites de frecuencia, tiene un factor de pérdidas dieléctricas que varía entre 0,003 y 0,09. La temperatura influye sobre el factor de pérdidas dieléctricas, siendo esta influencia mucho menor en el caso de mica blanca o moscovita, como puede apreciarse en la figura 51.

La resistividad de la mica es del orden de 10^{12} a 10^{15} ohmios cm²/cm, siendo la de la mica moscovita más alta que la de la mica flogopita.

En lo que se refiere a sus propiedades mecánicas, la mica resiste grandes esfuerzos perpendiculares al plano de laminación, pero las láminas tienen poca cohesión entre sí y se desmenuzan fácilmente en escamas muy delgadas o en hojas.

Las propiedades químicas de la mica son excelentes, ya que resiste el ataque de los gases normalmente presentes en los productos de la combustión. La mica moscovita no es atacada ni por el ácido clorhídrico ni por el ácido sulfúrico aunque estos productos estén concentrados, por el contrario la mica flogopita es atacada por el ácido sulfúrico. Ambos tipos de mica son atacados por el ácido fluorhídrico caliente, por el hidróxido potásico derretido, por los carbonatos alcalinos en caliente y por el agua que contiene anhídrido carbónico.

Calidades y aplicaciones de la mica pura

La mica se podría obtener originariamente en láminas u hojas grandes y, aún actualmente, se puede obtener en hojas de tamaño limitado. Sin embargo, y a causa del gran aumento de sus aplicaciones, han disminuido los tamaños en que se podía adquirir hace algunos años, de tal forma que, actualmente, se puede decir que el aislamiento de mica se hace casi exclusivamente de escamas. La mica en bruto se expende en hojas poligonales en distintos tamaños graduados que varían entre 1 pulgada cuadrada y 60 pulgadas cuadradas (6,45 cm^2 a 387 cm^2). Las laminillas o escamas, empleadas casi universalmente en productos comerciales de mica para aislamiento, se hacen deshojando los bloques de mica en láminas muy delgadas (de 0,015 a 0,025 mm de espesor): este proceso se realiza a mano, en el mismo lugar de origen. Las laminillas se aglomeran con productos especiales y se unen a otros materiales aislantes, tales como papel, cartón, etc., obteniéndose de esta forma los materiales aislantes a base de mica, de los que se hablará en próximos parágrafos.

Las hojas de mica pura se clasifican por los defectos que pueden presentarse y que son, principalmente, burbujas de aire, manchas y decoloraciones, las cuales alteran las propiedades originales de la mica pura: por ejemplo, el aire o la humedad interpuestos entre sus láminas reducen considerablemente la rigidez dieléctrica de la mica, pero aumentan su flexibilidad. A continuación, se reseña la clasificación de las hojas de mica según las normas americanas ASTM (American Society for Testing Materials) y las posibles aplicaciones de las distintas calidades:

1. Clara, libre de toda inclusión mineral o vegetal, de manchas, de inclusiones de aire, ondulaciones o bucles. Láminas transparentes duras. Aplicaciones: tubos de televisión, diafragmas de sonido.
2. Clara, ligeramente manchada.
   Aplicaciones: condensadores de magnetos de aviación, condensadores para emisoras de telecomunicación, condensadores especiales.
3. Medianamente manchada.
   Aplicaciones: condensadores de ajuste de sintonía para radio, condensadores de transmisión, condensadores de magnetos, válvulas termoiónicas.
4. Bastante manchada.
   Aplicaciones: condensadores de radio, soportes de válvulas termoiónicas, aislamiento de bobinas, aislamiento conjunto de conductores.

5. Manchada. Contiene arcilla y pigmentos vegetales, pero no inclusiones minerales.
   Aplicaciones: Bujías para motores de explosión, chasis de radio, soportes tubulares de utensilios de caldeo y soldadores.
6. Manchada y coloreada de negro. Contiene arcilla, pigmentos vegetales e inclusiones minerales.
   Aplicaciones: soportes de utensilios de caldeo y soldadores, aislamiento en general, arandelas aislantes, etc.

Limitaciones en el empleo de la mica pura

Como ha podido apreciarse en los parágrafos anteriores la mica es un material con excelentes propiedades dieléctricas, por lo que presta grandes servicios en la construcción eléctrica, allí donde es posible emplear directamente sus hojas o láminas. Pero su utilización en grandes espesores resulta muy delicada debido a la poca cohesión entre sus láminas y a la fragilidad de éstas. Los bloques de mica comprimidos a gran presión, sin aglomerante, solamente se emplean en aplicaciones limitadas.

Otro factor determinante que limita el campo de aplicación de la mica pura es el precio sobre todo, si se tiene en cuenta, que la tendencia es un aumento de consumo de este material, debido a sus excepcionales propiedades eléctricas y térmicas.

Por estas razones, en la actualidad casi toda la mica empleada en aplicaciones electrotécnicas lo es como material base de cierto número de compuestos aislantes en los que, de una manera general, las laminillas de mica quedan aglomeradas mediante un adhesivo orgánico (laca, resinas sintéticas, etc.) sobre un soporte que puede ser papel, cartón, vidrio, etc. Consiguiéndose de esta forma materiales aislantes a base de mica, mas económicos y con mejores propiedades mecánicas que ésta pero con inferiores propiedades dieléctricas y térmicas.

En los siguientes parágrafos se estudian los más interesantes de estos materiales.

Conceptos generales sobre los materiales aislantes a base de mica

De una manera general, se puede decir que los materiales aislantes a base de mica constan, esencialmente, de estos tres componentes:

1. Como material básico se emplean las laminillas o escamas de mica pura, material que determina las propiedades dieléctricas y térmicas del producto resultante.

2. Las laminillas de mica se aglomeran mediante productos orgánicos y minerales adecuados (goma laca, materiales plásticos, resinas de silicona, vidrio, etc.) las cuales, no solamente mejoran las propiedades mecánicas del producto resultante sino que, en en algunas ocasiones, también sus propiedades térmicas.
3. Muchas veces, aunque no en todos los casos, se utiliza un material aislante como soporte de las escamas de mica así agregadas; este material puede ser tela, papel, cartón, tejido de vidrio, etc. De esta forma, pueden mejorarse aún más las propiedades mecánicas del producto final.

Téngase en cuenta que, por ser la mica pura mejor material dieléctrico que los empleados como adhesivos y de soporte, el material que resulte tendrá inferiores propiedades aislantes aunque, tal como se ha dicho anteriormente, quedan mejoradas sus propiedades mecánicas y el producto final es más económico y fácil de trabajar.

Materiales empleados como aglomerantes de la mica pura

Como aglomerantes de las escamas de mica se emplean diversos materiales cuya naturaleza determina la clase térmica del producto resultante. Téngase en cuenta que la mica pura es un aislante de clase *C*, es decir, que puede trabajar permanentemente a temperaturas superiores a 180° C; la adición de aglomerantes, por lo general de inferiores cualidades térmicas, hace que el producto final resulte de una clase térmica inferior excepto en algunos casos, que se citarán oportunamente.

A continuación, se citan los más importantes materiales empleados como aglomerantes de la mica:

Durante muchos años, se empleó la *goma laca* casi exclusivamente y aún actualmente se emplea en gran proporción respecto a otros materiales.

La goma laca tiene buenas propiedades aislantes, seca fácilmente, une fuertemente y, como es termoplástica, permite a partir de láminas, obtener otras formas. Se obtienen de esta forma diversos materiales aislantes de clase *B* (temperatura de servicio hasta 130° C).

Actualmente, se emplean también aglomerantes plásticos fenólicos y alquídicos. Con los materiales fenólicos (por ejemplo, polvo de baquelita), se obtienen placas y tubos rígidos. Con los plásticos alquídicos, puede conservarse la flexibilidad, formando hojas y cintas con una capa de mica, que pueden arrollarse fácilmente. Los materiales obtenidos con estos aglomerantes son también de clase *B* (temperatura de servicio hasta 130° C).

También se emplean resinas de poliester y resinas epoxídicas, solas o con soporte de tejido de vidrio, obteniéndose entonces materiales aislantes de clase *F* (temperatura de servicio hasta 155° C).

Si el aglomerante es una resina de silicona, los materiales obtenidos tienen excelentes propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas y están considerados de clase *H* (temperatura de servicio hasta 180° C).

Finalmente, si se emplea como aglomerante un producto mineral apropiado, tal como el vidrio de bajo punto de fusión, se obtienen materiales de muy buenas propiedades mecánicas y eléctricas y extraordinarias propiedades térmicas, ya que se consideran como de clase *C* (temperatura de servicio que puede ser superior a 180° C).

La clase y proporción de aglomerante utilizado depende, naturalmente, de la aplicación que deba darse al material. De una forma general, puede decirse que cuanto mayor sea la proporción de aglomerante, más flexible y blando es el material que resulta. Por ejemplo, para aislamiento entre delgas de colectores, donde se necesita un material duro y resistente, el contenido de material aglomerante varía entre 3 y 5 %. Para materiales aislantes destinados a ser moldeados en caliente el contenido de aglutinante es de un 15 % mientras que si estos materiales han de poderse moldear en frío, la proporción de aglomerante aumenta hasta un 20 %. Por otra parte, en los materiales fabricados utilizando papeles tela como soporte, el contenido de mica disminuye considerablemente y, en algunos casos, no rebasa el 30 %.

Clasificación de los materiales aislantes a base de mica

Dada la gran variedad de materiales de este tipo existentes en el mercado, resulta muy difícil intentar una clasificación que los englobe a todos ellos. Se pueden clasificar estos materiales según diversos criterios:

1. Por la estructura del material básico, es decir, la mica:
   a) materiales con mica en forma de escamas
   b) materiales con mica en polvo
2. Por el aglomerante empleado:
   a) materiales aglomerados con resinas naturales
   b) materiales aglomerados con resinas sintéticas
   c) materiales aglomerados con resinas de silicona
   d) materiales aglomerados con productos inorgánicos

3. Por la clase de material utilizado como soporte:

a) materiales sin soporte

b) papeles de mica

c) telas de mica

d) materiales especiales.

Para el estudio de los materiales aislantes a base de mica, que se emprende a continuación nos limitaremos a describir aquéllos que se utilizan ampliamente en Electrotecnia, utilizando las denominaciones por las que más comúnmente son conocidos. Al describir cada tipo de material, se indicará su estructura, propiedades y aplicaciones. De esta forma, creemos que el lector podrá tener una idea clara sobre el amplio campo de utilización presente y futuro de estos materiales en Electrotecnia.

Micanita

La *micanita* fue introducida en el mercado, hace bastantes años, por la firma AEG. Está constituida por escamas de mica pegadas entre sí por medio de aglomerantes orgánicos, naturales o sintéticos (goma laca, resinas fenólicas, resinas epoxídicas, etc.). Ya hemos visto en un parágrafo anterior que la naturaleza del aglomerante empleado determina el comportamiento térmico de la micanita correspondiente. Por otra parte, la cantidad y calidad de dicho aglomerante determina también el campo de aplicación. La micanita para usos generales emplea como aglomerante la goma laca, citada anteriormente.

Según el contenido de aglomerante, las micanitas se clasifican como sigue:

a) *Micanitas para colector.* Se preparan con un mínimo de aglutinante (hasta 4 %) y se utilizan para aislamiento entre delgas de colectores. Cuando las delgas deben ranurarse, se utiliza la mica moscovita como material básico, debido a su dureza; en caso contrario, se emplea generalmente la mica flogopita que es más blanda. Como aglomerante se emplean la goma laca o diversas resinas alquídicas. En ambos casos, es suficiente la polimerización para evitar la exudación o deslizamiento bajo el calor y la presión. El material obtenido se presenta en forma de láminas rígidas.

b) *Micanitas para calefacción.* Se fabrican con escamas de mica flogopita, pegadas con un aglomerante (hasta 3 %), que se volatiliza

por combustión a 200° C, después de fabricado el aislante; a esta temperatura, se suprime el aglomerante, sin perjudicar las propiedades de la mica. Este material se aplica en forma de placas o moldeado a elementos de calefacción (planchas eléctricas, hornos, etc.) cuya temperatura de trabajo no exceda de 800° C. Pueden emplearse diversos aglomerantes orgánicos e inorgánicos.

c) *Micanitas para moldeado en caliente.* Se fabrican con escamas de mica moscovita en láminas delgadas o placas, de espesores comprendidos entre 0,25 y 3 mm. Como aglomerante se emplea generalmente la goma laca o materiales plásticos termoestables (por ejemplo, las resinas fenólicas) en una proporción que no puede exceder de 16 %. Para moldear las placas en la forma deseada, es necesario preparar primero una plantilla que represente el desarrollo exacto del producto moldeado. Se coloca luego éste sobre una plancha caliente o mesa de vapor y se calienta hasta unos 140° C, temperatura a la cual se reblandece lo suficiente para permitir su moldeado o prensado. Si se utiliza una resina fenólica el calentamiento no debe prolongarse más allá de su punto de reblandecimiento pues, de lo contrario, el material aglomerante fragua.

d) *Micanitas flexibles.* Están preparadas para su moldeado en frío, es decir, sin previo calentamiento. Como material básico se emplea la mica moscovita, en escamas muy finas y de gran superficie, aglomeradas con un aglutinante elástico, por ejemplo, las resinas epoxídicas. Se emplean para aislamiento de ranuras, revestimiento exterior de bobinas, como separador entre capas de bobinas, etc. Algunos de estos productos resisten temperaturas superiores a 132° C, sumergidos en aceite de transformador. Se admite hasta una proporción de 25 % de material aglomerante.

Las micanitas se conocen con diversas denominaciones comerciales: *Megomite, Micanite, Supermicanite,* etc.

Micasin

El *micasin* es un material muy moderno obtenido al separar química y mecánicamente la mica en pequeñísimas escamas y por sucesivos tratamientos térmicos y químicos transformar la mica en "pulpa de mica" que, como la pasta de papel, pasa luego por una máquina que la transforma en hojas delgadas y regulares, cuyo espesor varía entre 0,04 y 0,15 mm, el material se presenta en rollos de 1 m de anchura aproximada.

El micasin tiene mayor regularidad y continuidad en la distribución de partículas de mica que la micanita, de lo que resultan diversas ventajas:

a) mayor homogeneidad
b) gran regularidad de espesor y, por lo tanto, tolerancias mucho menores
c) reducción de espacios
d) mejores propiedades dieléctricas
e) mecanizado y troquelado más fácil

El micasin sirve de base a numerosos materiales aislantes, entre los que se pueden mencionar:

1. *Micasin para colectores.* Constituido por hojas de micasin aglomeradas entre sí, en caliente y a presión. Se suministra en tiras de longitud máxima de 1 m, o bien en placas de 1 × 5 m, con espesores a partir de 0,3 mm. El contenido mínimo de mica es de 93 %. Se emplea para aislamiento entre delgas de los colectores de máquinas eléctricas; por su preparación y presentación, resulta muy adecuado para fabricación en gran serie de colectores pequeños (láminas troqueladas). Como aglomerantes pueden utilizarse resinas alquídicas (clase térmica *B*) o resinas epoxídicas (clase térmica *F*).

2. *Micasin para calefacción.* Está constituido por hojas de micasin aglomeradas entre sí, en caliente y a presión. Se suministra en hojas de 1 × 5 m, o en piezas troqueladas de cualquier forma, en todos los espesores a partir de 0,10 mm. Según el aglomerante empleado se presenta en dos variedades:

a) Aglomerante mixto orgánico-inorgánico, resultando un aislante de clase térmica *H* (temperatura máxima de servicio 180° C), que puede utilizarse como soporte de elementos calefactores en todos los aparatos de calefacción eléctrica.

b) Aglomerante totalmente inorgánico, en cuyo caso se obtiene un excelente aislante de clase térmica *C*, que puede trabajar hasta a 600° C, sin exfoliarse, ni romperse. Destaca también su gran resistencia a la humedad, que lo hace insensible a las variaciones atmosféricas. Debido a la naturaleza del aglomerante, mantiene siempre su forma y, por consiguiente, puede emplearse como soporte de resistencias montadas al aire; también se recomienda su aplicación en estufas de sobremesa por aire caliente, tostadores de pan, asadores, etcétera.

La proporción mínima de mica es de 93 % en el micasin con aglomerante mixto, y de 85 % en el de aglomerante totalmente inorgánico.

Algunas denominaciones comerciales: *Dimicanit, Mica-mat, Micasin, Samica, Samicanita.*

Micarta

La *micarta* está constituida a base de polvo de mica, utilizándose como aglomerante una resina fenólica (por ejemplo, la baquelita en polvo). Tiene buena resistencia mecánica, no es higroscópica y resulta insoluble en la mayor parte de disolvente industriales. Sus propiedades eléctricas son semejantes a las de la ebonita, a la que sustituye muchas veces en sus aplicaciones.

Micalex

El *micalex* es un material formado por polvo de mica, obtenido por trituración o molienda, y un aglomerante vítreo fusible de vidrio blando o de borato de plomo en polvo, en la proporción de dos partes de mica y una de borato de plomo. Estos materiales, mezclados en polvo fino, se calientan hasta una temperatura de unos 675° C, que provoca el reblandecimiento del aglomerante, sin descomponer la mica; posteriormente, se moldean en caliente, con una prensa hidráulica hasta su completo enfriamiento.

El micalex es un material duro, vítreo, e impermeable a los líquidos y los gases. A pesar de su dureza, puede trabajarse con herramientas de acero rápido; se puede cepillar, tornear, perforar, roscar y partir. Se puede moldear fácilmente con gran finura de detalles y sobre este material puede moldearse aluminio estaño o cualquier aleación de bajo punto de fusión, sin perjudicarlo; es posible también moldear, en el lugar definitivo, inserciones o elementos de fijación metálicos o accesorios moldeados asegurados a elementos de montaje, vertiendo metal fundido en la unión.

El micalex tiene excelentes propiedades eléctricas, pequeño coeficiente de dilatación, buenas propiedades mecánicas y resulta prácticamente incombustible. Sus propiedades eléctricas se mantienen prácticamente invariables hasta unos 300° C, es decir que se trata de un aislante de clase térmica *C*. Tiene buena resistencia al arco eléctrico y, por su bajo factor de pérdidas, constituye un excelente dieléctrico para corrientes de alta frecuencia. Se fabrican variedades con constantes dieléctricas controladas entre 8 y 20.

Entre sus numerosas aplicaciones, se pueden citar:

a) Cierres de ánodo en rectificadores de vapor de mercurio.
b) Bujías de encendido para automóviles.
c) Soportes portaescobillas para motores sometidos a sacudidas (por ejemplo, en tracción eléctrica).
d) Cámaras de extinción para interruptores.
e) Bielas de mando de seccionadores.
f) Aisladores de antena para radiocomunicación.
g) Soportes de base para válvulas termoiónicas.

Algunas denominaciones comerciales: *G. E., Micalex, Microy, Turx.*

Si a la pasta de micalex modelada, se incorporan limaduras de hierro dulce en proporción conveniente, que quedan así sumergidas en dicha pasta, se obtiene un producto, al que se ha dado el nombre comercial de *Feromix* y que es, a la vez, un dieléctrico y un cuerpo magnético. La permeabilidad magnética de este material es de 4 a 5 veces mayor que la del aire. Se emplea sobre todo, en forma de barritas, para el cierre de ranuras en las máquinas eléctricas giratorias ya que, de esta manera, el flujo magnético se cierra fácilmente de un diente a otro, evitándose la saturación magnética en los dientes, al mismo tiempo que se consigue una reducción de las corrientes de Foucault.

Materiales aislantes a base de mica, con soporte

Las escamas o el polvo de mica pueden soportarse o en otros casos, cementarse entre cierto número de hojas o cintas de materiales aislantes flexibles, para aprovechar la ventaja de la alta rigidez dieléctrica de la mica. Estas hojas o cintas sirven de soporte para una, dos o tres capas de escamas o polvo de mica que de otra manera, tendrían pequeña resistencia mecánica. Como materiales aglomerantes se utilizan los ya citados en un parágrafo anterior: goma laca, resinas sintéticas, productos inorgánicos, etc. Como materiales de soporte se emplean, entre otros: el papel, la seda, el algodón, el acetato de celulosa, la fibra de vidrio, el amianto, las telas barnizadas, etcétera. Estos materiales se emplean sobre todo, para aislamiento de bobinas y ranuras y de ellos existe una gran variedad en el mercado por lo que, en la imposibilidad de reseñarlos todos, nos limitaremos a describir algunos de ellos, que hemos considerado los más característicos.

Papel de micanita. Este material está constituido por una capa de papel Japón, sobre la que se deposita mica en escamas, en un espesor de 6 a 7/100 mm; es flexible y resistente y soporta tensiones de hasta 3 kV, considerándose de clase térmica *B*.

Micafolio. Está compuesto por una o dos capas muy finas de mica en escamas, con un soporte de papel. Se prepara por cilindrado en caliente y se recubre luego con una capa de laca u otro aglomerante adecuado; las hojas de mica se unen en capas muy compactas, para conservar sus propiedades dieléctricas. Es un material muy flexible que se presenta en rollos. Su principal aplicación es como aislamiento de devanados de máquinas eléctricas, sobre los que se enrolla en frío, calentándose a continuación, finalmente, se aprietan y se enfrían en una prensa, que les da directamente la forma y dimensiones de la ranura en la que deben alojarse.

Según la naturaleza del aglomerante, se consiguen micafolios de diferentes clases térmicas de acuerdo con el siguiente cuadro:

Aglomerante	*Clase térmica*	
Goma laca	B	(130° C)
Resina de poliester	F	(155° C)
Resina epoxídica	F	(155° C)
Resina de silicona	H	(180° C)

Cinta y tela de micanita. Son productos que se obtienen con mica en escamas, superpuesta en una o más capas, unida con un material aglomerante flexible (goma laca, resinas sintéticas, etc.) a tejidos de seda, algodón, vidrio, etc. Para evitar el desprendimiento de la mica, en algunos casos se coloca un recubrimiento de papel fino. De esta forma se obtienen productos a base de algodón-mica-papel, seda-mica-papel, vidrio-mica papel, etc. que tienen un amplio campo de aplicación como aislamientos de bobinas en los devanados de máquinas eléctricas.

La clase térmica de los productos obtenidos depende, por una parte, del aglomerante empleado y, por otra parte, del material utilizado como soporte. Por ejemplo, los compuestos que emplean papel son de clase térmica *B*, cualesquiera que sean los aglomerantes empleados; naturalmente, en estos casos se utilizarán aglomerantes tales como la goma laca, el asfalto, las resinas alquídicas, etc., ya que no tiene objeto emplear aglomerantes de mejor calidad; los compuestos de clase térmica *F* han de tener como soporte exclusivamente el tejido de vidrio, en la combinación vidrio-mica-vidrio, utilizándose en este caso como aglomerantes, las resinas de poliester y las resinas epoxídicas; finalmente, pueden conseguirse materiales de clase térmica *H*

si, sobre la anterior combinación vidrio-mica-vidrio se emplean como aglomerantes, las resinas de silicona.

Cinta y tela de micasin. Estos productos están constituidos por hojas de micasin, pegadas sobre un soporte de tejido de vidrio mediante un barniz apropiado. Tienen las mismas aplicaciones que las cintas y telas de micanita, con las ventajas de una mayor flexibilidad y un encintado menos voluminoso.

Se expenden en el comercio las siguientes variedades:

a) Como aislantes de clase térmica *B* (130° C) cuando se utiliza como aglomerantes los compuestos asfálticos o las resinas epoxídicas.
b) Como aislantes de clase térmica *F* (155° C) si se emplea como aglomerante una resina epoxídica termoestable, que funde y endurece con el calor, fijando de esta forma las diversas capas de la cinta o tela, obteniéndose de esta forma un aislamiento muy compacto, térmicamente estable y con excelentes propiedades mecánicas y dieléctricas.
c) Como aislantes de clase térmica *H* (180° C) si el aglomerante empleado es una resina de silicona.

Resumen final

Como resumen de todo lo expuesto en el presente capítulo, a continuación se exponen en una tabla las más importantes características técnicas de las variedades de mica utilizadas en Electrotecnia, así como de algunos de los materiales a base de mica estudiados en parágrafos anteriores.

TABLA 29 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES A BASE DE MICA

Características	Mica moscovita	Mica flogopita	Micanita (moldeable en caliente)	Micanita (flexible)	Micanita	Micarta	Micalex (para usos generales)	Micalex (para telecomunicación)
Peso específico, en gr/cm³	2,6 ... 3,2	2,6 ... 3,2	2,3 ... 2,5	2,3 ... 2,5	2,3 ... 2,5	1,9 ... 2	3 ... 3,5	2,5 ... 3
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	—	—	400	—	—	—	550 ... 500	500 ... 700
Resistencia a la compresión, en kg/cm²	—	—	22 ... 40	—	—	—	1 500 ... 2 000	1 500 ... 2 500
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	—	—	1 500 ... 2 800	—	—	630	1 000 ... 1 400	1 200 ... 1 500
Temperatura máxima de funcionamiento, en °C	500	900	150 ... 180	150 ... 180	200 ... 500	150	500	500
Absorción de agua en 24 horas, en %	nula	nula	0,5	—	—	0,05	0,05	0,003
Resistividad, en ohmios-cm³/cm	10^{14} ... 10^{15}	10^{11} ... 10^{13}	2×10^{11}	2×10^{11}	10^{4}	—	5×10^{14}	8×10^{7}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 20 °C	40 ... 125	30 ... 100	35 ... 40	20 ... 25	50	12	15,4	14,4
Constante dieléctrica	4,5 ... 8	3,4 ... 6	3,4 ... 4	3,4 ... 4	3,5 ... 4	4,2	8,3	7,5
Factor de pérdidas (tg δ), hasta, MHz	0,001 ... 0,015	0,004 ... 0,07	0,0013 ... 0,0032	0,0013 ... 0,0032	0,001 ... 0,004	0,015	0,0023	0,002

8 Materiales aislantes celulósicos y textiles

Conceptos generales

Bajo la denominación genérica de *aislantes celulósicos* se engloban todos los cuerpos leñosos, los textiles y los papeles, cuya diferencia, desde el punto de vista químico es insignificante. La forma exterior del material determina todo lo referente a sus aplicaciones mecánicas, pero su composición química es la que define sus propiedades eléctricas. El material básico de todos estos materiales aislantes es la *celulosa*, que es un compuesto orgánico, constituido por 48 % de carbono, 46 % de oxígeno y 6 % de hidrógeno. Se trata de un hidrato de carbono, cuya fórmula general es

$$(C_6\ H_{10}\ O_5)_n$$

similar en su composición al almidón y que, en estado puro se presenta como una masa blanca amorfa. Tiene una resistividad de 10^8 a 10^{10} ohmios cm^2/cm, a la temperatura ordinaria, y una constante dieléctrica que varía entre 3,9 y 7,5. Todos los materiales de celulosa no tratada se destruyen alrededor de los 120° C y no deben someterse a temperaturas superiores a 90° C, es decir, que se trata de materiales de clase térmica Y (temperatura máxima de funcionamiento, 90° C).

Las propiedades eléctricas de los aislantes celulósicos dependen, esencialmente, de los dos factores siguientes:

a) Estructura química
b) Contenido de humedad

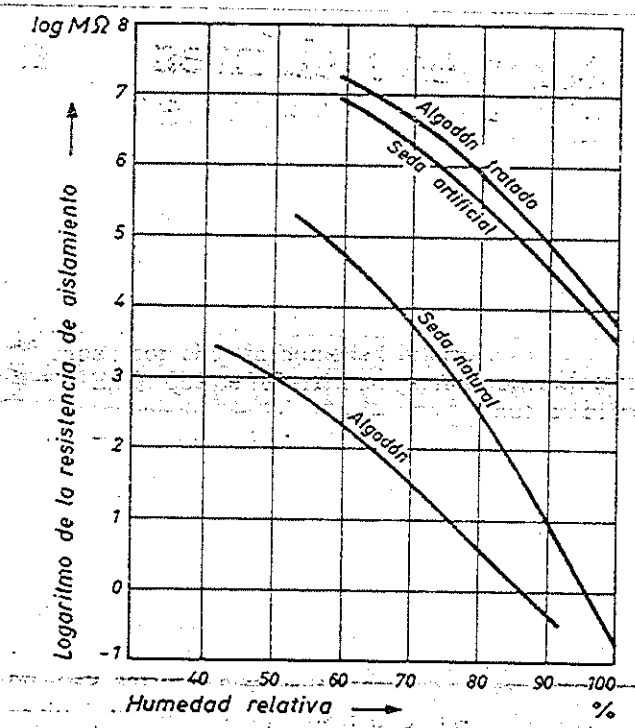


Fig. 52. — Variación de la resistividad de varios materiales textiles, en función de la humedad relativa.

Para un material dado, el contenido de humedad es función de la humedad relativa de la atmósfera ya que, en todos los casos, se trata de materiales higroscópicos. En la figura 52 se representa gráficamente la variación de la resistencia de varias materias textiles, en función de la humedad relativa.

A continuación se estudian los más interesantes aislantes celulósicos y sus aplicaciones electrotécnicas.

Madera

La *madera* está constituida por *celulósa*, en una proporción de 44 %, asociada a una sustancia dura, la *lignina*, que actúa como tejido de sostén de la anterior. Además, las diferentes variedades de madera, contienen otras sustancias que determinan, en muy buena parte, sus propiedades: resinas, almidón, aceites, tanino, materias colorantes, etc.

En Electrotecnia se emplean, por lo general, maderas duras, tales como el fresno, el arce, el nogal americano, el roble, la teca, etc. y para aplicación de soportes de líneas aéreas, el pino y el abeto. En estado natural, las maderas contienen demasiada humedad para poder ser empleadas directamente, por lo cual, es necesario secarlas, siendo el mejor procedimiento dejarlas al aire libre durante varios meses, sometiéndolas después a una desecación en caliente. En esta última operación, la temperatura del horno debe aumentar muy lentamente y al principio debe mantenerse cierto grado de humedad, para que los poros de la madera permanezcan abiertos y pueda escapar por ellos la humedad interior.

En lo que se refiere a sus aplicaciones electrotécnicas, el principal inconveniente de la madera está en que es higroscópica, si no se ha sometido a ningún tratamiento previo. Las maderas no tratadas, solamente se emplean como soportes de interruptores manuales de baja tensión y para hacer barras de unión y separadores entre las cuchillas de estos interruptores.

Mucho más frecuente es el empleo en Electrotecnia de la madera sometida previamente a diversos tratamientos de los que, a continuación, se citan los más importantes:

Tratamiento superficial con parafina. Con este tratamiento no se aumenta la rigidez dieléctrica del material tratado, únicamente se evita que la madera absorba la humedad atmosférica, es decir que se trata de una impermeabilización de la madera. El proceso para aplicar este tratamiento, es el siguiente:

a) Secado de la madera al vacío.
b) Cortado de la madera con las máquinas aserradoras, teniendo en cuenta la contracción y las posibles deformaciones, de forma que resulten las piezas con las dimensiones previstas.
c) Colocación de las piezas en la cuba de impregnación.
d) En la cuba de impregnación se vierte parafina fundida a 90° C y se mantiene esta temperatura durante unas 24 horas, agregando la parafina necesaria para cubrir perfectamente la madera.
e) Se baja lentamente la temperatura hasta 55° C y se vacía la cuba de parafina.
f) Se deja enfriar la madera hasta la temperatura ambiente, antes de sacarla de la cuba de impregnación.

Tratamiento a fondo con parafina. Este tratamiento se aplica a todas las piezas de madera, que no hayan de estar sumergidas en aceite y a las que se exige una elevada rigidez dieléctrica. Para este tratamiento deben emplearse maderas completamente sanas y cubas de impregnación abiertas. El proceso es el siguiente:

a) Se coloca la madera en el baño, con planchas de sujección entre cada dos capas.
b) Se cubre la madera con parafina a 80° C y se mantiene esta temperatura hasta que cesa la ebullición en la superficie del líquido.
c) Se eleva lentamente la temperatura hasta 120° C.
d) Se mantiene la temperatura de 120° C. hasta que desaparece totalmente la ebullición y la formación de espuma.
e) Se deja enfriar el baño hasta que se solidifique la parafina. En este momento, se hace un ensayo dieléctrico sobre una de las piezas o sobre un trozo de madera colocado en la cubeta. Si el ensayo es satisfactorio, se sacan las piezas del baño, en caso contrario se vuelve a empezar el tratamiento.

Tratamiento con aceite de linaza. Este tratamiento se emplea para las piezas de pequeña sección, para hacerlas impermeables, pero sin que por ello mejoren las cualidades dieléctricas propiamente dichas. El proceso es el siguiente:

a) Antes de dar forma a las piezas, éstas se secan a fondo, en la estufa y al vacío.
b) Cuando se han conformado las piezas a las dimensiones previstas, se colocan en una estufa a unos 60° C.
c) Se montan las piezas en una cuba de impregnación abierta.
d) Se cubren estas piezas completamente con aceite de linaza crudo; entre el corte de las piezas y la inmersión no deben mediar más de 24 horas.
e) La impregnación de las piezas ha de durar, como mínimo, 48 horas, se comprueba la penetracción del aceite por medio de una probeta, que se asierra en el sentido de su mayor espesor, después de escurrido el aceite. Si la impregnación es insuficiente, se prolonga el tratamiento durante otras 24 horas.
Una vez ha penetrado el aceite a fondo, se vacía la cuba y se deja escurrir durante unas 6 horas.

Tratamiento con aceite de linaza a presión. Con este tratamiento, además de impermeabilizar la madera, se mejoran también sus propiedades dieléctricas. Se sigue el siguiente proceso:

a) Después de conformadas las piezas, se seca bien la madera a la estufa.
b) En otra estufa se tienen las piezas durante 30 a 36 horas a unos 75° C y a la presión atmosférica; al cabo de dicho tiempo, se retiran las piezas y se pasan inmediatamente al baño de aceite de linaza.

c) Se cubren las piezas con aceite de linaza crudo, de propiedades dieléctricas previamente conocidas, y se tapa la cuba de impregnación.
d) Se impregnan las piezas durante 5 a 8 horas, a una temperatura de unos 110° C bajo una presión de 7 a 8 kg/cm².
e) Se vuelve el aceite de linaza al depósito, y se dejan escurrir las piezas durante 2 a 3 horas, con la cuba cerrada y a temperatura constante de 100° C.
f) Después de comprobada la rigidez dieléctrica en una probeta, se procede a una cocción oxidante a 100° C durante 36 horas en una estufa.
g) Se abre la estufa, se deja enfriar lentamente y se quitan las asperezas producidas por el aceite oxidado.

Si se quiere dar a las piezas un buen acabado, se les aplica una capa de barniz secante al aire, prolongando la desecación durante 36 horas.

Tratamiento con aceite de transformador. Este tratamiento se aplica a las piezas de madera que han de estar sumergidas en aceite (por ejemplo, piezas separadoras en transformadores), este tratamiento mejora las propiedades dieléctricas de la madera y, además, elimina el contenido de humedad que pudiera tener.
El proceso es el siguiente:

a) Una vez dispuestas las piezas en la cuba cerrada, se eleva lentamente la temperatura hasta 90° C; la duración de esta elevación de temperatura será de 36 horas.
b) Se hace un vacío de 600 mm de mercurio, durante unas dos horas.
c) Se termina el vacío y se calienta la cuba durante 6 a 7 horas, elevando lentamente la temperatura hasta unos 100° C.
d) Se repite el tratamiento indicando con *b* y *c* cada 8 horas, durante una semana, aproximadamente.
e) Se eleva la temperatura hasta 115° C y se hace el vacío, cada 8 horas y durante hora y media cada vez, a lo largo de otra semana.
f) Se repite nuevamente el tratamiento anterior, elevando la temperatura hasta 125° C valor límite que no debe sobrepasarse.
g) Aparte, se calienta el aceite de transformador hasta 110° C y una vez desecada la madera, este aceite se hace pasar por una prensa filtro; después, se sumerge la madera en el baño.
h) Se tiene en contacto la madera con el aceite, a la temperatura de 110° C y a la presión atmosférica, hasta que se termine la impregnación, operación que requiere unos 3 días.

i) Se enfría el baño hasta que la temperatura del aceite descienda a 45° C y, al mismo tiempo, se hace volver el aceite a su depósito, a través de una prensa-filtro, lo más rápidamente que sea posible. A continuación, se comprueba la rigidez dieléctrica de una probeta, como se hace en los demás tratamientos reseñados anteriormente.

De los diferentes estudios realizados sobre el empleo de la madera, utilizada como soporte aislante, se han deducido las siguientes consecuencias:

1. La madera puede emplearse ventajosamente como aislante contra las sobretensiones atmosféricas, sobre los postes de madera normalmente utilizados en las líneas de transporte y distribución de energía eléctrica.
2. También puede emplearse la madera en los brazos transversales de los soportes, para asegurar un aislamiento resistente a las ondas de sobretensión tanto sobre líneas con aisladores de apoyo como con aisladores de suspensión.
3. La tensión disruptiva o de contorneamiento de las partes aislantes de madera depende de la sección de éstas. Esta tensión es tanto menor cuanto mayor es la sección del aislante.
4. La tensión disruptiva o de contorneamiento en los brazos transversales, es función de la clase de madera; el abeto es superior, en este aspecto, al pino y al cedro.
5. Los ensayos efectuados sobre madera en atmósfera húmeda demuestran que su rigidez dieléctrica disminuye considerablemente en presencia de humedad o de lluvia. Con esta última, el aislamiento se reduce casi a la mitad.

Posiblemente el mayor empleo de las diferentes clases de madera en aplicaciones electrotécnicas como apoyos en líneas aéreas de transporte y distribución de energía: postes, crucetas, palomillas, etc. Este tema está tratado con suficiente extensión en el volumen de esta obra dedicado a "Instalaciones Eléctricas Generales", al que remitimos al lector interesado por una mayor ampliación de esta cuestión. La madera también se emplea pulverizada, en forma de un material muy fino conocido como harina de madera, que se utiliza algunas veces como relleno en aislamientos aglomerados o moldeados.

Modernamente, se utiliza la madera impregnada a base de baquelita, también denominada *permalí*. Las ventajas de los soportes aislantes de permalí proceden de las propiedades inherentes a las resinas sintéticas: aumento de la resistencia mecánica, poca combustibilidad, mejora de las propiedades dieléctricas, etc. Conviene advertir que el

permalí puede emplearse en aplicaciones de alta frecuencia, debido a que su factor de pérdidas dieléctricas es muy reducido.

Para terminar el presente parágrafo, debe recordarse que la madera sin impregnar está considerada como material aislante de clase térmica *Y* (temperatura, 90° C), mientras que la madera impregnada o sumergida en dieléctrico líquido (por ejemplo, aceite de transformadores) se considera como material aislante de clase térmica A (temperaturas 105° C).

Fibra

Con el nombre de *fibra* se conocen varios productos de aplicación en Electrotecnia.

La *fibra normal* es un material a base de serrín de madera molido (harina de madera), tratado con caucho y mezclado con sangre de vaca, comprimida en caliente a elevada presión. Este material se presenta en el comercio en forma de barras y placas, de espesor variable, de tonos rojizo, gris o negro, obtenidos mediante colorantes adecuados. Este material tiene buenas propiedades mecánicas y aislantes y se emplea, sobre todo, como cuñas de cierre de ranuras.

La fibra vulcanizada se obtiene tratando papel de trapo de algodón con cloruro de zinc, lo que hace que el papel se gelatinice en parte. El papel tratado se pasa sobre un cilindro calentado, donde se lamina al espesor deseado. La masa homogénea así obtenida se lava con agua hasta que se extrae totalmente el cloruro de zinc y otras sustancias que pudieran estar contenidas. La fibra así purificada, se seca, se prensa y se satina quedando en disposición de ser utilizada.

La fibra vulcanizada absorbe hasta un 60 % de agua cuando se la sumerge en este líquido durante cierto tiempo, y aumenta su volumen hasta hacerse casi el doble. Los disolventes orgánicos y los aceites no tienen acción sobre la fibra pero es atacada por los ácidos fuertes.

La fibra vulcanizada tiene, de por sí, de 5 a 6 % de humedad natural y del 40 al 60 % de humedad relativa, que decrece cuando la humedad ambiental es reducida y aumenta en caso contrario. Se seca calentándola entre 80 y 100° C durante períodos largos, curvándose y perdiendo su flexibilidad y su resistencia mecánica. Entre 100 y 170° C se seca muy rápidamente y se hace quebradiza en unas cuantas horas. La temperatura máxima de seguridad es de unos 150° C.

Se fabrica la fibra vulcanizada en los colores gris, negro, rojo y

blanco, siendo pocas las diferencias de propiedades entre muestras de colores diferentes.

En el comercio se presenta en varias calidades, que dependen de la selección de la materia prima, aumento de presión para aumentar la densidad y la dureza, y esmero en la elaboración. Las calidades normales de la fibra vulcanizada se dividen en cuatro clases:

1. *Fibra eléctrica.* Llamada así porque su empleo principal es como aislamiento eléctrico de ranuras, etc. Tiene gran resistencia mecánica, buena flexibilidad y alta rigidez dieléctrica y se fabrica en espesores de hasta 3 mm; este aislamiento delgado de fibra se conoce también con el nombre de *papel de pescado*.

2. *Fibra comercial.* Esta variedad se emplea para fines mecánicos y eléctricos y cubre una gran variedad de aplicaciones. Generalmente se presenta en forma de tubos y barras de sección circular.

3. *Fibra dura.* Es considerablemente más dura que la calidad comercial, anteriormente reseñada, mayor resistencia mecánica y propiedades eléctricas semejantes a la anterior. Se presenta en forma de tubos y barras de sección circular.

4. *Fibra moldeable.* Esta variedad contiene glicerina, con objeto de ablandar el material, reteniendo parte de la humedad; de esta forma, se puede moldear y estampar, eliminándose después la humedad. Esta variedad tiene menor rigidez dieléctrica que las anteriores.

Todas las calidades de fibra vulcanizada pueden trabajarse con máquinas herramientas, taladrarse y, dentro de ciertos límites, modelarse en seco. Para operaciones más difíciles las chapas de fibra deben ser sumergidas en agua y moldeadas en caliente la fibra vulcanizada se curva bien, paralelamente a la veta.

Papel aislante

El papel se fabrica con pulpa de madera, trapos o fibras vegetales. Los procesos esenciales de la fabricación son los siguientes:

a) Reducción del material en bruto, constituido esencialmente por celulosa, a una pulpa fina, por medio de operaciones que incluyen el empleo de sustancias químicas y de vapor.

b) Paso de la pulpa fina de celulosa a través de un tamiz continuo de malla fina, el cual retiene las fibras apelotonadas.

c) Apartado, secado y acabado de la pasta así formada.

El papel terminado retiene trazos del material de blanqueo y, además, contiene frecuentemente cierta cantidad de material de carga, tal como arcilla, sulfato de calcio, y otras materias minerales inertes.

Algunas veces se añade un apresto de solución vegetal o mineral para hacer menos poroso el papel y mejorar su superficie.

Las propiedades mecánicas del papel dependen, en gran parte, de las fibras básicas empleadas en su fabricación. Los papeles más empleados como materiales aislantes, son los siguientes:

Papel de trapo, elaborado con un mínimo de productos químicos y aditamentos, obteniéndose un papel fuerte, de resistencia térmica algo mayor que los papeles obtenidos de pulpa de madera y productos químicos. Por su buena resistencia mecánica, se utiliza para aislamiento de ranuras. Los *papeles de condensador* muy finos (0,013 milímetros de espesor) son, generalmente, papeles de trapo o de mezcla de trapo y de pulpa de madera. Los materiales básicos para la fabricación del papel de trapo son los trapos de algodón y de lino.

Papel Kraft, que es el más utilizado como papel aislante: tiene color tostado y puede impregnarse fácilmente. Se obtiene a partir de la pulpa de madera, por tratamiento con sulfato sódico. Es más económico que el anterior y, convenientemente tratado, puede resultar de tan buenas o mejores propiedades mecánicas o eléctricas. Se emplea para aislamientos de conductores y cables, para hojas laminadas y tubos impregnados, o como refuerzo para aislamiento compuestos. Cuando es muy satinado, se conoce con el nombre de *papel express* y entonces puede barnizarse, pero no impregnarse.

Papel Manila, llamado también *papel de hilo* se fabrica a partir de fibra de cáñamo de Manila y de trapos viejos, es un papel fino, muy blanco y de gran resistencia mecánica a pesar de su ligereza.

Papel Japón, que se fabrica a partir de pulpa de madera de morera. Tiene pequeño espesor (0,025 mm), es de aspecto sedoso, de color blanco y de gran resistencia mecánica. Se emplea como material básico en la fabricación del *micafolio*, material que se describe en el capítulo dedicado a los aislantes a base de mica.

Papel de celulosa a la sosa, fabricado a partir de la fibra de madera, previamente cocida. Durante las operaciones de secado e impregnación el papel está sometido a temperaturas bastante elevadas, por lo que debe ser resistente al calor, una de las propiedades esenciales para ello, es la permeabilidad. Calandrando fuertemente el papel, adquiere buenas propiedades dieléctricas, pero disminuye el tamaño de los canalillos que constituyen las fibras y, por lo tanto, la porosidad del papel, así como su facilidad de impregnación por los aceites y barnices.

Papel acetilado, utilizado, sobre todo, como aislamiento de cables. Se obtiene por procedimientos semejantes a los empleados para el

algodón hilado. La celulosa tratada con ácido acético, se transforma parcialmente en acetato de celulosa y, por esta causa, adquiere muy buenas propiedades dieléctricas. Si esta transformación se efectúa convenientemente, no se alteran las propiedades mecánicas de las fibras y el material tratado puede sufrir las mismas operaciones que antes del tratamiento.

La consistencia porosa del papel procede de la estructura microscópica de los filamentos que constituyen las fibras, esta estructura da al papel propiedades capilares muy marcadas, lo que explica la gran facilidad que tiene para impregnarse por gases y líquidos y, sobre todo, por el agua. En efecto, el papel es muy higroscópico, ya que en condiciones normales ya contiene del 5 al 10 % de agua y aún tiene tendencia a absorber la humedad ambiente. Por esta causa, el papel debe desecarse sometiéndole a un tratamiento a la estufa, con temperaturas de 80 a 100° C. Además, y para eliminar cualquier trazo de partículas conductoras ocluidas, deben lavarse varias veces con agua pura, alcohol o cloroformo.

Pero, a pesar de todo, el papel no impregnado o barnizado, aunque se haya desecado a la estufa, no tiene buena rigidez dieléctrica, debido a su porosidad. El aire ocluido en sus poros se ioniza en campos eléctricos relativamente débiles y esta ionización provoca rápidamente la perforación eléctrica del aislante, como consecuencia del calentamiento producido por el aumento del valor del factor de pérdidas dieléctricas; en la figura 53 se aprecia la variación brusca de este factor, en el momento en que comienza la ionización.

Por todas estas razones, el papel seco, sin impregnar, solamente se emplea en casos especiales, por ejemplo en el aislamiento de cables telefónicos, donde se utiliza el papel Manila ligeramente arrugado y flojamente arrollado, para dejar el mayor espacio de aire posible, es necesario mantener el papel completamente seco, por lo que deben utilizarse cubiertas herméticas de plomo u otro material impermeable a la humedad, con juntas y manguitos cuidadosamente soldados.

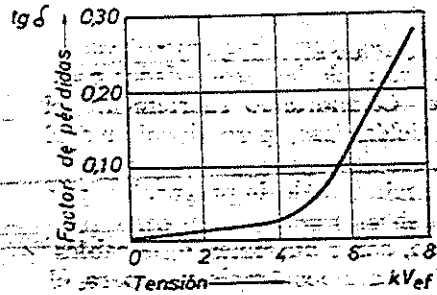


Fig. 53. — Variación del factor de pérdidas dieléctricas del papel no impregnado, en función de la tensión aplicada.

En casi todas las demás aplicaciones electrotécnicas, el papel se emplea impregnado o sometido a tratamiento especiales que eliminan su humedad y aumentan sus propiedades dieléctricas. A continuación se estudian algunos de estos tratamientos.

Papel impregnado con aceite

Mediante la impregnación del papel con barnices, aceites, resinas, etcétera, se consiguen varios resultados.

a) los materiales de impregnación llenan los poros del papel y tienden a eliminar la humedad.

b) se aumenta la rigidez dieléctrica aunque el papel esté completamente seco, ya que se elimina el aire ocluido que es causa, como se ha visto en el anterior parágrafo de fenómenos de ionización.

c) la mayor parte de los materiales de impregnación contribuyen a formar superficies pulidas.

d) generalmente, los materiales de impregnación aumentan la resistencia al calor del material básico.

e) en algunos casos, el llenado de los poros reduce la tendencia a la contracción.

f) los materiales de impregnación tienden a aumentar la conductividad térmica del papel, resultando de ello una mejor eliminación del calor.

La impregnación se realiza con *aceite fluido*, similar al de los transformadores, o con *aceite espeso*, constituido por una mezcla de 75 % de aceite mineral y 25 % de colofonia, que es una resina natural procedente de lo residuos de la destilación de la esencia de trementina (aguarrás), que se obtiene del pino y otras coníferas. El aceite espeso no debe fluir a temperaturas de 40 a 50° C, ni solidificarse a temperaturas inferiores pero, en cambio, ha de ser suficientemente fluido para permitir una buena impregnación del papel en caliente a 130° C. La masa aislante que resulta es consistente pero plástica a la temperatura ordinaria, volviéndose fluida en caliente, por lo que el papel la absorbe, rellenando así todos los poros y evitando de esta forma la ionización del aire, lo que provoca, como ya sabemos, un aumento de las pérdidas dieléctricas del papel. Para evitar la entrada de humedad, los cables u otros elementos conductores, aislados con papel impregnado, han de ir provistos, de una cubierta estanca de plomo o de aluminio que rodea las capas aislantes, y los extremos se hacen herméticos mediante manguitos terminales.

Hasta hace unos años, el papel impregnado, con aceites minerales o con resinas, era el único dieléctrico empleado en los cables subterráneos, tanto de alta como de baja tensión. Actualmente, y a pesar de la aparición de nuevos materiales aislantes, el papel impregnado es todavía el más utilizado de los materiales aislantes en esta aplicación específica.

Papel baquelizado

El *papel baquelizado*, llamado también *papel duro*, es uno de los materiales aislantes más empleados en la técnica de la alta tensión. Para ciertas aplicaciones, que reseñaremos más adelante, hasta el presente no se ha encontrado otro material que lo aventaje.

Los materiales básicos son:

1. Cinta de papel aislante, que ha de ser muy resistente desde los puntos de vista eléctrico y térmico. Por los diferentes fabricantes se han adoptado dos tipos de papel:

a) papel poroso, que permite una impregnación total por el barniz.
b) papel satinado, más liso, en el que se marca más claramente la separación entre las capas de papel y de barniz.

El papel poroso tiene mejores propiedades eléctricas mientras que el papel satinado tiene mayor resistencia mecánica.

2. Barniz de baquelita *A* (resol). Por aplicación de calor, la baquelita pasa del estado *A* (resol) al estado *B* (resitol) hacia los 95° C y de éste al estado *C* (resita), por exposición prolongada a una temperatura superior a 110° C. Pero estas modificaciones tienen lugar, casi siempre, con desprendimiento de agua, por lo cual es indispensable eliminar este agua, durante el proceso de fabricación del papel baquelizado.

Para la fabricación del papel baquelizado, se impregna íntimamente el papel con el barniz de baquelita a temperatura y presión altas (140° C y 150 kg/cm), obteniéndose el material terminado en forma de placas. También se fabrican tubos de este material, arrollando sobre cilindros metálicos, el papel recubierto con barniz por una de sus caras, a base de hacerlo pasar, previamente, por cilindros recalentados hasta 180° C. Las operaciones del proceso de fabricación, deben hacerse cuidadosamente, ya que las propiedades eléctricas y mecánicas del papel baquelizado pueden quedar afectadas. Se han comprobado experimentalmente los siguientes resultados:

a) el factor de pérdidas dieléctricas depende, en gran parte, de la temperatura del cilindro, que debe ser de unos 180° C, para obtener el mínimo de pérdidas.
b) el factor de pérdidas y la constante dieléctrica dependen considerablemente de la carga del barniz.
c) La resistencia mecánica aumenta a la vez que la carga de barniz, sobre todo para el papel poroso.
d) para obtener productos de buena calidad dieléctrica, debe fijarse una carga, cuidadosamente determinada.
e) los productos que deban someterse a esfuerzos mecánicos importantes, han de tener una mayor carga de barniz.

Cuando se fabrica bien el papel baquelizado, este material presenta las siguientes propiedades.

a) una rigidez dieléctrica sensiblemente igual en frío que en caliente.
b) un factor de pérdidas dieléctricas que varía muy poco con la temperatura.

Según la clase de papel elegido (poroso o satinado) y el tipo de barniz, se obtienen diferentes propiedades eléctricas y mecánicas. Los fabricantes distinguen las siguientes calidades de papel baquelizado.

Clase I. Papel baquelizado para solicitaciones eléctricas intensas, especialmente para empleo bajo aceite hasta 110° C.
Clase II. Papel baquelizado para solicitaciones principalmente mecánicas y solicitaciones eléctricas normales.
Clase III. Papel baquelizado para aplicaciones en telecomunicación (bajo factor de pérdidas dieléctricas para alta frecuencia).
Clase IV. Papel baquelizado para aplicaciones especiales en telecomunicación (muy baja absorción de humedad y bajo factor de pérdidas dieléctricas para alta frecuencia).

Además se fabrican papeles baquelizados para aplicaciones especiales, por ejemplo, resistentes a los climas tropicales, resistentes a los ácidos, etc.

El papel baquelizado se expende en el comercio en forma de placas de 2 000 × 1 200 × 80 mm, de superficie mate o ligeramente brillante y color ordinariamente parduzco, aunque también puede ser negro, amarillo o rojo. También se presentan como tubos, de diferentes dimensiones. Además, si se disponen capas de papel baquelizado en el interior de moldes a altas temperaturas, se pueden obtener cuerpos moldeados, de múltiples formas, comprimiendo tubos circulares, se pueden obtener también otros tipos de secciones (tubos ovalados, barras macizas, etc.).

El papel baquelizado tiene excelentes propiedades dieléctricas y mecánicas. Siempre es higroscópico: la absorción de humedad se reduce por la impregnación, pero nunca puede suprimirse totalmente, por lo que deben adoptarse las correspondientes precauciones en el empleo de este material, para evitar que absorba la humedad ambiente.

Una gran ventaja del papel baquelizado es la facilidad con que puede trabajarse con distintos tipos de herramientas: efectivamente, puede soportar las operaciones de serrado, taladrado, roscado, torneado, fresado, troquelado y cepillado, adoptando, en todos estos casos, las herramientas y disposiciones recomendadas por los fabricantes.

Algunas denominaciones comerciales del papel baquelizado: *Grax, Pertinax, Repelit, Trolitax.*

Las aplicaciones del papel baquelizado son muy numerosas y se pueden dividir en aplicaciones generales y aplicaciones especiales siendo en estas últimas donde este material resulta prácticamente insustituible.

Entre las aplicaciones de tipo general, se pueden citar:

1.° Tubos de sección circular o piezas moldeadas de igual sección:
   a) Aislamiento de barras, de tubos, o de varillas de sujeción.
   b) Soportes de barras, bielas aislantes para aparatos eléctricos.
   c) Canales aislantes para máquinas eléctricas giratorias.
   d) Armazones de bobinas.

2.° Cilindros o piezas moldeadas de igual sección:
   a) Aislamiento de los devanados de transformadores entre sí y de la masa.
   b) Recubrimiento de cajas de interruptores.
   c) Chimeneas para interruptores de aire.
   d) Construcción de bornes de alta tensión, tipo condensador (por ejemplo, pasatapas de transformadores y condensadores de alta tensión).

3.° Placas de papel baquelizado.
   a) Tableros y tabiques aislantes empleados en las estaciones transformadoras de alta y baja tensión.
   b) Tableros soportes de instrumentos de medida y de control.
   c) Soportes de material radioeléctrico.
   d) Pantallas separadoras para transformadores, interruptores, en baño de aceite, etc.

Entre las aplicaciones especiales del papel baquelizado, cabe destacar:

1.° Aislamiento entre devanados de alta y de baja tensión en los transformadores. La condición de pérdidas mínimas, se traduce en una rigidez dieléctrica casi independiente de la temperatura, lo que conduce a una constante dieléctrica baja, de 3,5 a 4,5. Este valor es casi igual al del aceite que actúa como aislante general del transformador y, como desde el punto de vista dieléctrico, el aceite y el papel están en serie, resulta un mejoramiento en la distribución de las solicitaciones dieléctricas a que están sometidos estos dos materiales aislantes.

2.° Bornes de tipo condensador. Estos bornes, que son macizos, trabajan en condiciones de enfriamiento muy difíciles. Deben fabricarse con papel baquelizado que corresponda a un valor mínimo de pérdidas dieléctricas, a un mínimo de variaciones dieléctricas en función de la temperatura y a un valor máximo de cohesión mecánica y de impenetrabilidad para el aceite caliente de los transformadores.

El papel baquelizado se considera un aislante de clase térmica *E*, lo que corresponde a una temperatura máxima de trabajo continuo, de 120° C.

Al final del presente capítulo se reseñan, en una tabla, las más interesantes propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas del papel baquelizado.

Cartón aislante

El *cartón aislante* se fabrica con las mismas materias primas que el papel, pero la presión aplicada durante la fabricación es mayor. Es más grueso, menos flexible y, por lo general, más denso que el papel. Se corta con guillotina o con troqueles y en estado húmedo puede prensarse en caliente, para constituir piezas de formas apropiadas; si conviene, se añade un material aglutinante (por ejemplo, caseína).

En su estado natural, el cartón aislante es higroscópico y debe impregnarse con aceite, cera, barniz u otros compuestos, para mejorar sus propiedades dieléctricas y preservarlo de la humedad. Cuando no se requieren extraordinarias condiciones dieléctricas (por ejemplo, en aplicaciones de baja tensión) el cartón impregnado es satisfactorio como aislante y resulta barato en comparación con otros materiales aislantes.

Se presenta en planchas y en rollos. Según los materiales básicos que lo constituyen, el cartón aislante recibe diferentes denominaciones entre las que citamos las más conocidas:

Presspan. Está fabricado con fibras de madera y se presenta en forma de hojas de cartón fuerte, cuyas caras están endurecidas y vidriadas. El espesor de estas hojas está comprendido entre 0,1 y 5 milímetros. Es un material muy empleado para el aislamiento a baja tensión de las piezas de pequeños accesorios, como interruptores, conmutadores, etc., y también se emplea en las máquinas eléctricas giratorias para el aislamiento de las ranuras y en los transformadores como separadores.

La composición de éste cartón debe ser preparada cuidadosamente: la cantidad de celulosa ha de ser bastante elevada y el resto ha de estar formado por papeles viejos convenientemente escogidos; debe contener poca carga, estar medianamente encolado, muy limpio, exento de cualquier traza metálica y ser químicamente neutro.

El vidriado se obtiene en laminadores especiales muy fuertes y de este vidriado dependen sus cualidades dieléctricas e higroscópicas cuando se emplea seco.

Excepto en algunas aplicaciones (arandelas aislantes para pequeños aparatos, separadores en interruptores domésticos, etc.) el presspan se utiliza convenientemente barnizado; en este caso, mejoran extraordinariamente sus propiedades dieléctricas y, además, queda protegido contra la humedad ambiente; véase en la figura 54 la variación de la rigidez dieléctrica del presspan barnizado, en función del espesor.

Leatheroid. Es un cartón aislante, a base de celulosa, de tono gris pizarra, con caras endurecidas, vidriadas o no. Sus propiedades

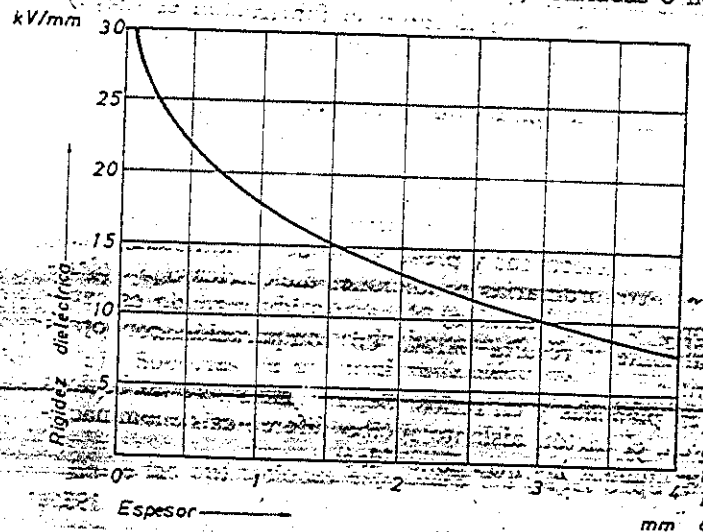


Fig. 54. — Variación de la rigidez dieléctrica del presspan barnizado, en función del espesor.

y utilización son casi las mismas que las del presspan, pero solamente se fabrican en espesores comprendidos entre 0,1 y 1 mm. Resulta algo más rígido que el presspan y admite menos dobleces sin romperse.

Pressboard. Es un cartón aislante absorbente, con gran proporción de algodón, que se impregna fácilmente en aceite, barniz o baquelita. Es muy ligero, por estar poco comprimido, y se pliega y moldea con gran facilidad.

Fullerboard. Este cartón aislante tiene una proporción de algodón superior al 50 %, por lo que tiene muy buenas propiedades dieléctricas. Puede laminarse y moldearse fácilmente y, por su gran proporción de algodón que es muy absorbente, se impregna con facilidad con aceite, barniz, etc. Se emplea, sobre todo, para aplicaciones en alta frecuencia.

Transformer board. Es un cartón aislante de calidad superior, constituido únicamente por celulosa y pasta de trapos; soporta con toda facilidad el repujado y los esfuerzos mecánicos. Este material, sin impregnar, es comparable, por sus cualidades dieléctricas al presspan ordinario impregnado.

Telas aislantes

Las *telas aislantes* son tejidos fabricados con fibras animales (seda), vegetales (algodón, lino, yute, cáñamo), minerales (amianto, vidrio) y sintéticas (rayón). En el presente capítulo nos referiremos más especialmente a las fibras animales y vegetales, ya que las telas procedentes de las fibras minerales y sintéticas, se describen en otros capítulos de este mismo volumen.

Las fibras utilizadas como materiales básicos para fabricación de telas aislantes son, por naturaleza, higroscópicas. Por ejemplo, el algodón y el lino contienen normalmente alrededor de 8,5 % de humedad, la seda contiene cerca del 11 % pefo, en ciertas condiciones, puede absorber hasta un 30 % de su peso y aún aparecer seca. Esta humedad es muy perjudicial para el aislamiento eléctrico y, por esta razón, dichos materiales deben impregnarse adecuadamente, con objeto de mejorar sus propiedades aislantes. De esta forma, las propiedades dieléctricas de una tela aislante quedan prácticamente determinadas por tres factores:

a) cantidad de agua absorbida.

b) resistividad determinada por la cantidad de materiales electrolíticos presentes en la tela.
c) estructura de la tela.

Por ejemplo, la resistividad del algodón es unas 10^{12} veces mayor con un porcentaje de humedad de 1 % que con uno de 90 % y, para porcentajes de humedad intermedios sigue ciertas leyes matemáticas en función de dicho porcentaje.

Las telas aislantes se presentan, generalmente, de tres formas diferentes:

1. Telas no tratadas
2. Telas impregnadas con aceite
3. Telas impregnadas con barniz

Las *telas no tratadas* utilizadas como aislamiento consisten, principalmente, en manguitos de algodón blanco, cinta de lienzo de algodón, hilos de algodón o de lino, etc. El algodón y la seda se cuentan entre los materiales más empleados para el revestimiento de conductores eléctricos para bobinados pero, generalmente, no se utilizan sin impregnación, debido a sus propiedades higroscópicas; remitimos al lector interesado por esta cuestión, al volumen de la presente obra dedicado, entre otros temas, a los bobinados de máquinas eléctricas. Estos materiales no tratados, se consideran de clase térmica *Y* (temperatura máxima de trabajo, 90° C).

Las *telas impregnadas con aceite* o *telas aceitadas* se tratan en caliente en autoclaves, con aceite de parafina. Se encuentran en forma de bandas, rollos o tiras y, también, en forma de trenzados cilíndricos. Estas telas, solas o en combinación con otros aislantes, se emplean en el aislamiento de ranuras, paneles de transformadores, etc. Si estas telas se someten a potenciales inferiores a 3 kV, tanto su constante dieléctrica como su factor de pérdidas dieléctricas, son independientes de la tensión y las pérdidas dieléctricas son rigurosamente proporcionales al cuadrado de esta tensión. Por encima de este valor de 3 kV y a medida que aumenta la tensión, aumentan cada vez con mayor rapidez, tanto la constante dieléctrica como el factor de pérdidas. En la figura 55 puede apreciarse, por otra parte, la variación del valor de la rigidez dieléctrica de una tela aceitada, en función de la temperatura. La tela aceitada se considera como aislante de clase térmica *A* (temperatura máxima de trabajo, 105° C).

En las *telas impregnadas con barniz* o *telas barnizadas* las propiedades dieléctricas dependen, en gran parte, del barniz con que están impregnadas, ya que la tela sirve, principalmente, como soporte. La tela debe mantener suficientemente cohesionada la capa de

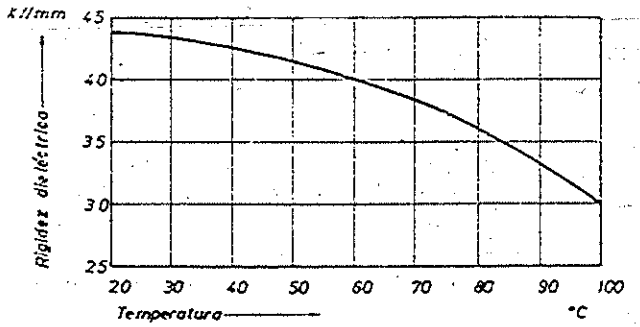


Fig. 55. — Variación de la rigidez dieléctrica de la tela aceitada, en función de la temperatura.

barniz, de forma que éste no sufra menoscabo al doblarse la tela, cuando se aplica dicho material. Los barnices para telas se preparan especialmente para obtener flexibilidad, por lo que tienen gran contenido de aceite, el barniz se aplica en dos a ocho capas y se seca al horno entre capa y capa.

Para telas barnizadas generalmente se aplica el tejido de algodón; el material resultante se conoce con los nombres comerciales de *cambric barnizado* (algodón encolado con almidón y posteriormente barnizado, lo que da una tela bastante rígida), *muselina barnizada, tela imperial, lienzo barnizado*, etc.

Los barnices empleados pueden estar fabricados a base de resinas naturales o de resinas sintéticas, la constitución y característica de estos barnices se estudian en los capítulos correspondientes a los materiales básicos de cada barniz.

La tela barnizada está considerada también como aislante de clase térmica *A* (temperatura máxima de trabajo, 105° C).

Cintas aislantes

Aunque las *cintas aislantes* son, propiamente, telas aislantes cortadas a tiras de gran longitud, hemos creído conveniente estudiarlas en un parágrafo aparte. Las cintas aislantes pueden dividirse en cuatro clases:

a) Cintas no tratadas
b) Cintas tratadas con barnices
c) Cintas bituminosas
d) Cintas adhesivas

Las *cintas no tratadas* se hacen a base de tejidos de algodón, seda, vidrio, y amianto. Son higroscópicas y, por lo tanto, de propiedades

aislantes no enteramente satisfactorias, a menos que sean posteriormente impregnadas o protegidas de la humedad.

Las *cintas tratadas con barnices* se cortan de hojas de tela tratadas y se emplean para encintar devanados que no pueden impregnarse fácilmente. Se cortan en forma recta o al sesgo. El corte recto se emplea en cables, barras colectoras, conductores rectos y encintados, aplicados a máquina. El corte al sesgo se utiliza especialmente para el encintado a mano o para formas irregulares, debido a que es más rígido, consiguiéndose con ello un recubrimiento más tenso y liso y libre de huecos.

Las *cintas bituminosas* se obtienen haciendo pasar tiras de algodón a través de un baño de materiales bituminosos fundidos, con objeto de llenar los poros del tejido y dejar un ligero exceso en la superficie del mismo. El material impregnado puede ser asfalto natural, asfalto de gas de petróleo, betún ácido graso, etc., o combinaciones de éstos; los fundentes, cuando son necesarios, se hacen a base de brea, asfalto blando, aceites, grasas, etc. Estas cintas se fabrican en anchos de 12 a 25 mm y espesores de 0,38 a 0,64 mm, con proporción, en peso, de 1/3 de tela y 2/3 de material bituminoso, y se emplean, sobre todo, en el empalme de cables subterráneos.

Las *cintas adhesivas* consisten, esencialmente, en tiras de tejido de algodón, impregnadas con compuestos aislantes adhesivos, que contienen caucho (cintas claras) o betún (cintas negras). ~~Se hacen en anchos comprendidos entre 15 y 50 mm, y~~ son muy empleadas para empalmes en baja tensión.

Estratificados a base de materias celulósicas

Los *estratificados*, llamados también *laminados*, están constituidos por láminas u hojas superpuestas de un material base o soporte y de una resina que lo impregna, la cual actúa de aglutinante entre cada estrato o lámina, consiguiéndose una perfecta unión entre sus elementos constituyentes durante el proceso de fabricación, bajo presión y a temperatura elevada.

Los materiales celulósicos, por su propia estructura, son muy adecuados como soporte de estratificados; en la imposibilidad de dar noticia de los numerosos materiales existentes de esta clase, a continuación exponemos algunos de ellos, con las denominaciones comerciales de la firma AISMALIBAR.

Estratificados a base de papel:

Celisol. Se trata de un papel especial, tratado con resina sintética. Se presenta en placas, tubos, canales, barras y toda clase de piezas moldeadas y mecanizadas. Tiene excelentes propiedades mecánicas y

dieléctricas. Se emplea como material aislante de alto valor dieléctrico para transformadores en baño de aceite o al aire, material telefónico, aparatos de radio, televisores, etc.

Olisol. Como soporte, se emplea un papel absorbente especial, encolado "a punto" con resinas sintéticas de fenol-formol. Está indicado su empleo en la construcción de transformadores, interruptores, condensadores y otros aparatos para tensiones elevadas, que han de trabajar sumergidos en aceite.

Cobrisol. Son placas estratificadas a base de papel tratado con resina sintética, que llevan adheridas en una o en ambas caras, una lámina conductora de cobre electrolítico. Se emplea en la fabricación de circuitos impresos, destinados al conexionado de circuitos electrónicos, transistores, aparatos de radio y de televisión, etc.

Estratificados a base de tejido:

Celotex. Es un material a base de tejidos tratados con resina sintética. Se presenta en placas, tubos, barras, canales, discos y piezas moldeadas de múltiples formas, destacando los engranajes y cojinetes. Se caracteriza por su gran resistencia mecánica y su bajo coeficiente de deslizamiento, lo que le hace adecuado para la construcción de cojinetes. Tiene gran resistencia a la humedad, aceites, ácidos y bases diluidas y disolventes orgánicos. Se puede utilizar en todos los casos en que se precise un buen aislante con elevada resistencia mecánica.

Celodur. Material a base de tejido de algodón tratado con resinas de melamina-formol, constituyendo un conjunto compacto y homogéneo de excelentes propiedades mecánicas y dieléctricas, con reducido coeficiente de absorción de la humedad y muy buena resistencia a las fugas superficiales. Se presenta en placas, tubos y barras y tiene aplicación en cuadros de distribución, placas frontales de aparatos, mesas de laboratorio, etc.

Estratificados a base de madera:

Celulita. Se trata de placas y piezas de madera seleccionada, tratada con resina sintética. Por su gran dureza y resistencia a los agentes atmosféricos, es especialmente indicado para la construcción de piezas aislantes para railes de enclavamiento eléctricos, piezas aislantes para señalización, paletas de ventiladores, parquets aislantes, etc.

Resumen

Como resumen del presente capítulo, a continuación se exponen en una tabla las más interesantes características técnicas de los más importantes materiales celulósicos y textiles empleados en Electrotecnia.

TABLA 30. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES CELULÓSICOS Y TEXTILES

Características	Celulosa seca	Madera de haya seca	Madera de haya parafinada	Madera de roble seca	Fibra normal	Fibra vulcanizada	Papel kraft seco	Papel kraft baquelizado	Cartón prensado seco	Cartón prensado acetilado	Cartón prensado barnizado	Tela barnizada amarilla	Tela barnizada negra
Peso específico, en g/cm³	0,91 ... 0,95	0,62 ... 0,85	0,62 ... 0,85	0,7 ... 0,96	> 1,35	> 1,3	0,8 ... 1	< 1,12	1,1	1,1	1,1	1,24	1,26
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	23 ... 10	31	31	31	420	410	—	700 ... 1 200	—	—	—	—	—
Resistencia a la compresión, en kg/cm²	—	400 ... 600	400 ... 600	400 ... 510	1 400	> 2 100	—	1 000 ... 1 500	—	—	—	—	—
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	—	400 ... 500	400 ... 500	9 ... 10	810	910	—	800 ... 1 500	—	—	—	—	—
Temperatura máxima de funcionamiento, en °C	90	90	105	90	125	125	90	105	90	90	90	105	105
Absorción de agua, en 24 horas, en %	—	—	—	—	< 65	< 60	—	8 ... 11	Alta	—	—	—	—
Resistividad en ohmios-cm/cm	10^4 ... 10^{13}	—	3×10^{14}	—	2×10^{11}	2×10^{11}	—	10^{14}	10^9	—	—	10^{10}	—
Rigidez dieléctrica, en kV/mm, a 20 °C	—	—	—	—	6 ... 8	6 ... 8	30 ... 40	30	—	30	16	35 ... 45	32 ... 42
Constante dieléctrica ε	4 ... 7,5	4,1	4,1	3,64 ... 6,84	7,5 ... 5	7,5 ... 5	3,5	3,5	2,0 ... 4,5	3	3	4,5 ... 3,5	4,5 ... 3,5
Factor de pérdida (tg δ) a 50 Hz	—	—	—	—	—	—	0,005	0,015	—	—	—	0,04	0,06
Factor de pérdida (tg δ) a 1 MHz	—	—	0,015	0,019	0,05	0,05	—	0,03	—	—	—	0,03	0,02

9 Conceptos generales sobre los materiales plásticos empleados en electrotecnia

Generalidades

Aunque el nombre de *plásticos* es el más extendido y utilizado para denominar los materiales que se van a estudiar en el presente capítulo, en lenguaje técnico, reciben el nombre de *resinas sintéticas;* pero tampoco este nombre parece muy apropiado, puesto que existen ciertas diferencias entre los plásticos y las propiamente llamadas resinas sintéticas, como se verá más adelante. En lenguaje corriente, cualquiera de los dos nombres es igualmente utilizado; en nuestra explicación adoptaremos el de *materiales plásticos* o simplemente *plásticos,* que parece ser el más corrientemente empleado.

Dada la extensión y orientación de la presente obra, no es posible, ni de lejos, estudiar con detalle, la constitución, propiedades, características y campos de aplicación de todos los materiales plásticos utilizados en Electrotecnia; para ello existen ya excelentes obras especializadas, que puede consultar el lector particularmente interesado en esta materia. Nos limitaremos a dar unas nociones generales sobre la constitución y los métodos de fabricación de los plásticos, y también a describir los materiales plásticos más utilizados en Electrotecnia.

Definición de material plástico

La gran difusión alcanzada por los plásticos, su variedad, y la multiplicidad de sus aplicaciones, dificulta el definir de una manera

precisa lo que es un material plástico. De las definiciones que hemos encontrado, ésta es la que nos ha parecido más exacta y completa:

Con el nombre de *materiales plásticos* se conocen en la tecnología y en el comercio, unas mixturas (resinas fenólicas, derivados vinílicos, derivados proteínicos, etc.) que en una de las fases de su fabricación han sido realmente plásticas (es decir dúctiles, blandas, que se dejan moldear fácilmente) y que moldeadas o extruidas, tales mixturas permiten obtener los más variados objetos sólidos de aplicación en la industria y en la economía doméstica (tubos, placas, piezas de forma complicada, aplicaciones para equipos eléctricos, juguetes, etcétera).

La mayoría de los plásticos son relativamente modernos. Se puede considerar que el primer plástico enteramente sintético fue introducido en 1908 por León Baekeland, con el nombre de *baquelita*, material muy conocido y apreciado por los electricistas, por sus excelentes características aislantes. Hacia 1937, aparecieron las resinas polivinílicas, obtenidas a partir de los gases combustibles naturales, y de gran aplicación en Electrotecnia. Durante la última guerra, la falta de materias primas impulsó extraordinariamente el desarrollo de los plásticos, al ser necesario encontrar otros productos que pudieran sustituir a aquéllas. En un principio, los plásticos fueron materiales de recurso, utilizados solamente cuando no era posible disponer de otros materiales, pero la experiencia demostró sus excelentes cualidades dieléctricas, mecánicas y químicas, y se implantó su empleo industrial de forma masiva. Desde entonces, su desarrollo y expansión ha sido realmente fabuloso y aún actualmente siguen descubriéndose nuevos materiales plásticos, con propiedades muy interesantes para aplicaciones electrotécnicas, por lo que nuestra explicación habrá de ser, forzosamente, limitada.

Estructura general de un material plástico

Casi todos los materiales plásticos son *compuestos de carbono* es decir, que el *carbono* constituye la base sobre la que se forman los materiales plásticos. El símbolo químico del carbono es *C* y su estructura atómica está representada en la figura 56. Consta de un núcleo central con 6 cargas positivas o *protones*, en el que está contenido además casi toda la masa, y de 6 cargas negativas o *electrones* que giran alrededor del núcleo en 2 órbitas: en la primera órbita (la más cercana al núcleo) giran 2 electrones y en la segunda órbita giran 4 electrones.

Los 4 electrones de la segunda órbita pueden ser compartidos con otro u otros cuerpos a los que falten o sobren electrones, formando

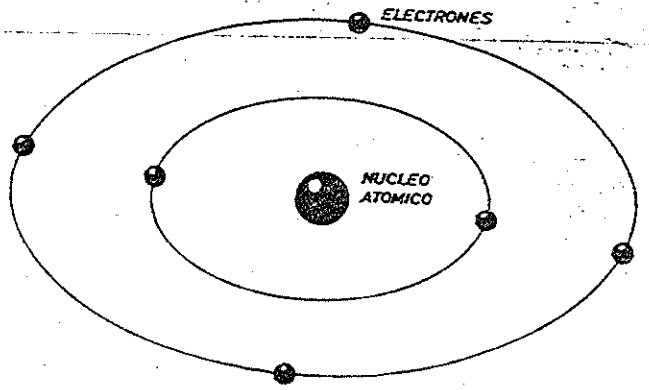


Fig. 56.—Constitución del átomo de carbono.

moléculas, de tal forma, que el número total de electrones compartidos tiende a ser ocho. Un ejemplo aclarará estos conceptos: el hidrógeno tiene un solo electrón orbital; cuatro átomos de hidrógeno tendrán cuatro electrones orbitales. Estos cuatro átomos de hidrógeno, pueden combinarse con un átomo de carbono, formando una molécula de un nuevo cuerpo denominado *metano*. En esta molécula, los cuatro electrones de la segunda capa del átomo de carbono, quedan compartidos con los cuatro electrones correspondientes a los cuatro átomos de hidrógeno, es decir, que la molécula de metano tiene una capa exterior de ocho electrones. La fórmula química simplificada del metano es,

$$CH_4$$

porque cuatro átomos de hidrógeno se han combinado con un átomo de carbono. La fórmula química desarrollada es,

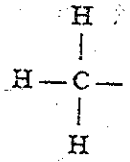
$$\begin{array}{c} H \\ | \\ H-C-H \\ | \\ H \end{array}$$

Las rayitas indican *enlaces químicos* y representan la unión de un electrón del carbono con un electrón del hidrógeno. El metano es un *compuesto saturado*, porque todos los electrones de la capa exterior del carbono tienen su correspondiente enlace con los electrones de los átomos de hidrógeno.

Si se pudiera conseguir que *solamente* tres átomos de hidrógeno se combinaran con un átomo de carbono, se obtendría,

$$C\,H_3$$

cuya fórmula desarrollada es,



en la que, como puede apreciarse, queda un enlace sin cubrir. Se trata de un *compuesto no saturado*, llamado también *radical* y que, en nuestro caso particular se denomina *metilo*.

Por lo general, los radicales no son estables, ya que el electrón libre del carbono tiende a unirse con otros electrones de los átomos vecinos.

A los cuerpos que contienen carbono se les llama, en general, *compuestos orgánicos*. Por lo tanto, el metano es un *compuesto orgánico saturado* y el metilo es un *radical orgánico*.

Los compuestos orgánicos existentes en la Naturaleza y en los que, para su composición, no ha intervenido la mano del hombre, son *compuestos orgánicos naturales* e incluyen casi todos los compuestos que constituyen la materia viva. Entre ellos, se pueden citar, la celulosa, la glucosa, la urea, etc. Cuando el hombre, mediante procedimientos químicos, obtiene compuestos a base de carbono, se trata de *compuestos orgánicos sintéticos* y, en ellos, están incluidos los que hemos denominado *materiales plásticos*, materia de estudio del presente capítulo.

La característica principal de los plásticos es el estar constituidos por *macromoléculas*, es decir, moléculas gigantes. Estas macromoléculas están formadas por muchas moléculas sencillas (a veces, varios miles de ellas), enlazadas entre sí en forma de una larga cadena, muchas veces cerrada en anillo, conteniendo cada macromolécula, millares y hasta millones de átomos, de carbono e hidrógeno principalmente, aunque también entran en sus composición otros cuerpos, como se verá oportunamente.

A las macromoléculas se les llama también *polímeros*. Por lo tanto, un polímero es una macromolécula, o molécula gigante, constituida por el enlace de varias moléculas sencillas, iguales o distintas, repetidas en forma de cadena. Esta denominación se aplica también

a los cuerpos formados por este tipo de moléculas gigantes. O sea que, al decir que los plásticos son polímeros, queremos expresar que las moléculas de que están constituidos son macromoléculas.

Ya hemos dicho que un polímero se compone de un número determinado de moléculas sencillas encadenadas o enlazadas entre sí.

Cuando las moléculas sencillas que constituyen un polímero no están aún enlazadas, siendo cada una de ellas independiente, el cuerpo es un *monómero*. Para obtener un polímero, se parte de un monómero, que ha de ser debidamente *activado*: uniendo entre sí las moléculas sueltas y activadas de un monómero, se obtienen las cadenas que forman el polímero correspondiente; por lo tanto los monómeros activados vienen a ser los eslabones de esta cadena. Así pues, un polímero es siempre el resultado de la transformación de un *monómero*. A esta transformación de un monómero en un polímero, se le llama *polimerización*.

El número de moléculas sencillas o *meros* que componen el polímero es muy diverso y puede comprender desde simples *dímeros*, *trímeros*, *tetrámeros*, etc. (es decir, de dos, tres, cuatro, etc. unidades), hasta polímeros compuestos por varios millares de unidades.

Resumiendo, las características de los polímeros, son las siguientes:

1. Son macromoléculas (grandes moléculas).
2. Están formados por repetición de moléculas simples.
3. Se obtienen por polimerización de los monómeros.
4. Pueden estar constituidos por muy diverso número de unidades.
5. Su peso molecular es muy elevado (consecuencia de su gran tamaño).

Para la mejor comprensión de los conceptos expuestos, vamos a explicar la formación del *polietileno*, plástico muy utilizado en Electrotecnia.

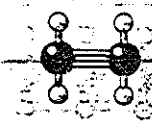


Fig. 57.—Molécula de etileno.

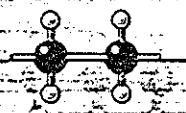


Fig. 58.—Molécula de etileno activada.

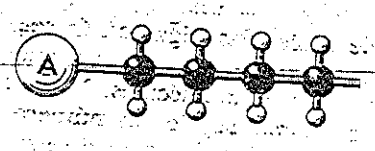
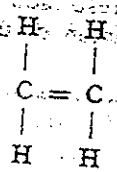


Fig. 59.—Formación del polietileno por reacciones sucesivas del etileno con un radical libre.

En la figura 57, se ha representado una molécula de *etileno*. El etileno, uno de los productos químicos que ha alcanzado mayor importancia industrial en el mundo, es un gas incoloro, compuesto exclusivamente por carbono e hidrógeno. En la citada figura 57 las bolas grandes representan átomos de carbono y las bolas pequeñas, átomos de hidrógeno. La fórmula desarrollada del etileno es,



y la fórmula abreviada es,

$$CH_2 = CH_2$$

El etileno es un monómero. Ahora, no podría formar polímero porque sus moléculas no tienen ningún enlace libre para unirse a otras moléculas. Para formar un polímero, ha de ser activado. La molécula de etileno activada tiene la forma indicada en la figura 58. Al reaccionar el etileno con un radical libre A—, se convierte en otro radical y éste vuelve a reaccionar con otra molécula gigante con carácter de radical, llamada *mero* (Fig. 59). El proceso puede representarse de la siguiente forma:

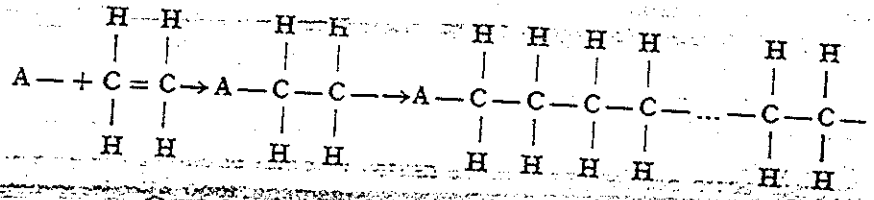
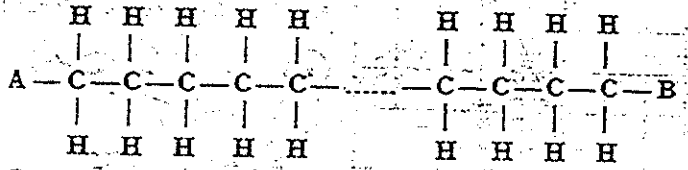


Fig. 60.—Molécula de polietileno saturada

Este radical macromolecular reacciona finalmente con otro radical presente B—, dando el polímero final (Fig. 60); este cuerpo resultante final, puede representarse como sigue:



que es el plástico denominado *polietileno*. Ahora, por no tener ningún enlace libre no puede adherirse ya ninguna otra molécula de etileno. Por lo tanto, el polietileno es un compuesto orgánico saturado. Como hemos dicho anteriormente, esta cadena polimérica puede ser más o menos larga; y, desde el punto de vista técnico, el plástico tendrá tanto mejores propiedades cuanto mayor sea el número de monómeros activados que constituyen la cadena polimérica.

El monómero activado, bien sea formando ya parte de la cadena polimérica, o preparado para formar un polímero, recibe el nombre de *mesómero*.

Polimerización

El proceso químico de formación de un polímero a partir de un monómero, sometido a ciertas condiciones, se denomina *polimerización* o, también, *reacción polimérica*.

Para que se produzca la reacción polimérica, es necesaria la intervención de ciertas sustancias llamadas *catalizadores*, en cuya presencia, el monómero se convierte en polímero, por la unión de varias unidades estructurales o *meros*, enlazadas entre sí.

Si el número de meros de la cadena resultante es pequeño, por ejemplo, de 2 a 10 se obtienen cuerpos denominados dímeros, trímeros, tetrámeros, etc. y las sustancias resultantes son, por lo general, líquidos, gases o sólidos quebradizos. La mayoría de los polímeros sólidos empleados en Electrotecnia, están constituidos por un número de meros que varía desde pocas unidades hasta cientos de miles de ellas.

Toda polimerización o reacción polimérica se desarrolla en tres fases o periodos, que se denominan respectivamente:

1. *Fase de inducción*
2. *Fase de propagación*
3. *Fase final o de terminación*

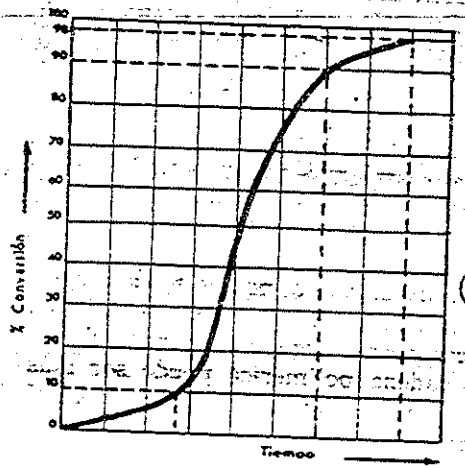
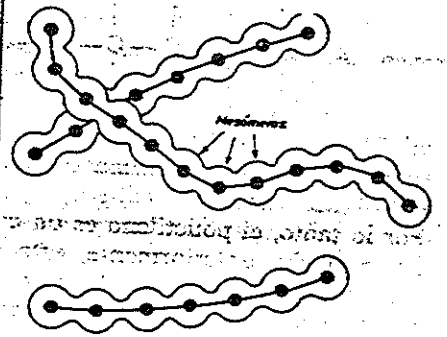


Fig. 61.—Representación gráfica del proceso de polimerización.

Fig. 62.—Cadenas poliméricas lineales.



El proceso típico de polimerización se puede representar gráficamente en un sistema de ejes coordenados. Situando en ordenadas el tanto por ciento del monómero que se convierte en polímero y en abcisas el tiempo, se obtiene el gráfico de la figura 61 en el que se distinguen:

Primera fase: *Iniciación o inducción.* En este período, la reacción progresa lentamente, hasta una conversión del 10 %, aproximadamente.

Segunda fase: *Propagación.* La velocidad de la reacción aumenta y se produce un embalamiento, hasta una conversión del 90 %, aproximadamente.

Tercera fase: *Terminación.* Disminuye la velocidad y termina la conversión al 98 % aproximadamente, quedando una pequeña cantidad de monómero sin reaccionar.

Las cadenas poliméricas resultantes de la polimerización pueden estar orientadas en una sola dirección, siendo independientes unas de otras (Fig. 62) y entonces se llaman *cadenas lineales*. Según los elementos constituyentes del polímero, pueden estar unidas unas cadenas con otras formando *cadenas ramificadas* (Fig. 63), por haberse iniciado la formación de una cadena a partir de un punto de otra cadena. Finalmente, en un grado elevado de conversión, estas ramificaciones pueden convertirse en puentes entre las cadenas lineales y el polímero forma entonces *cadenas entrecruzadas* o *reticulares* (Fig. 64) que se extienden en las tres dimensiones del espacio.

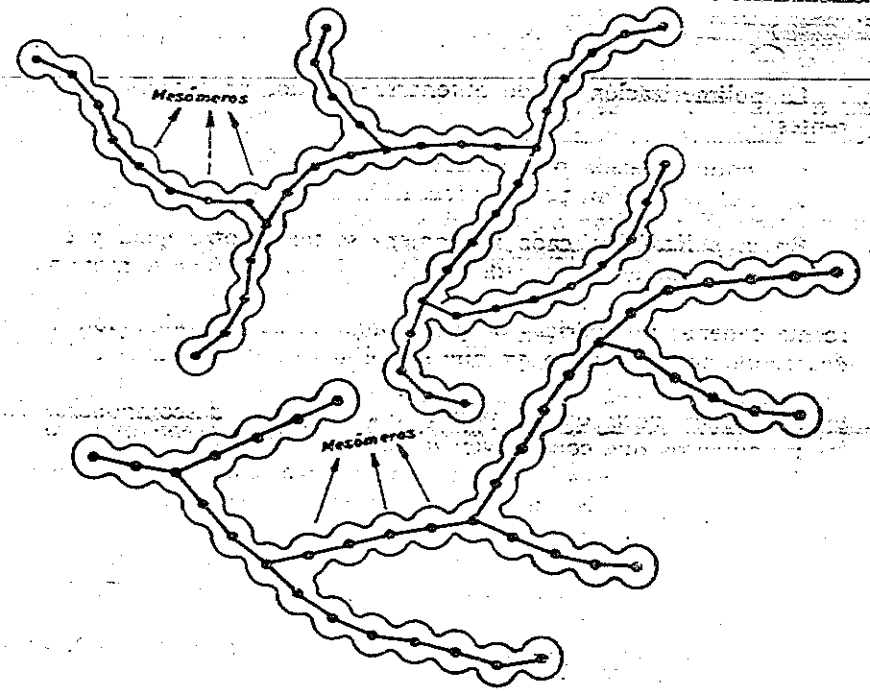


Fig. 63.—Cadenas poliméricas ramificadas.

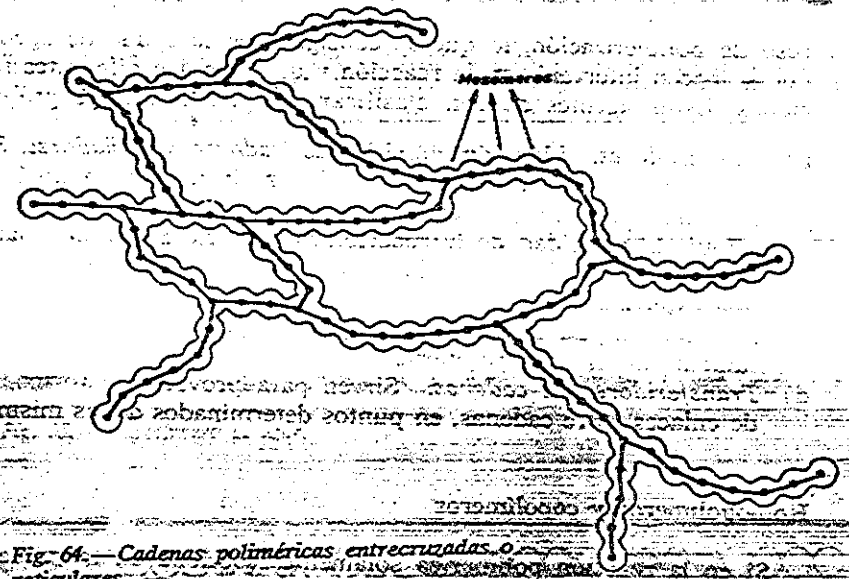


Fig. 64.—Cadenas poliméricas entrecruzadas o reticulares.

La polimerización puede obtenerse por dos procedimientos diferentes:

a) polimerización por adición o *poliadición*
b) polimerización por condensación o *policondensación.*

En la *poliadición*, cada monómero se une a otro igual y éste a otro, etc. formando así la cadena polimérica en la que este monómero es la unidad que se repite. Generalmente, pueden obtenerse de esta forma cadenas poliméricas de gran longitud. En la poliadición no se desprende cuerpo alguno, ya que el polímero obtenido es la suma de los monómeros que reaccionan y es siempre un proceso reversible, lo que quiere decir que el polímero final puede descomponerse en los monómeros que constituyen la cadena polimérica.

En la *policondensación*, un monómero reacciona con otro monómero distinto para dar lugar a un tercero, que es la unidad que se repite en la cadena polimérica. La policondensación se caracteriza, además, por el hecho de que, al final de la reacción se produce el desprendimiento de agua o de alguna otra sustancia. La operación de policondensación es irreversible, lo que quiere decir que el polímero resultante no se puede descomponer en los monómeros con los que se iniciaron esta operación.

Naturalmente, para obtener materiales plásticos con unas características determinadas y que cumplan, en cada caso, las condiciones necesarias para su utilización, debe controlarse debidamente el proceso de polimerización, lo que se consigue con la ayuda de agentes que se hacen intervenir en la reacción y que cumplen diferentes funciones. Estos agentes pueden clasificarse en los siguientes grupos:

a) *Catalizadores.* Llamados también *activadores* o *iniciadores.* Sirven para activar los monómeros e iniciar la reacción polimérica.
b) *Retardadores.* Se utilizan algunas veces, cuando conviene disminuir la velocidad de la reacción polimérica. En determinadas ocasiones, una excesiva velocidad de reacción, podría provocar una explosión.
c) *Inhibidores.* La intervención de estos agentes detiene completamente la reacción polimérica.
d) *Transferidores de cadenas.* Sirven para provocar la formación de enlaces entre cadenas, en puntos determinados de las mismas.

Homopolímeros y copolímeros

Si en la reacción polimérica solamente reacciona un monómero, el polímero final se dice que es un *homopolímero.* Este es el caso,

por ejemplo del polietileno, cuya formación se ha explicado en un parágrafo anterior y constituido exclusivamente de moléculas de etileno activado.

Por el contrario, cuando dos monómeros, de los que cada uno de ellos, independientemente, puede formar un polímero diferente, reaccionan conjuntamente, se obtiene un polímero de características distintas a cualquiera de los que se hubieran obtenido por las reacciones poliméricas separadas. Este cuerpo se denomina *copolímero* y tiene propiedades intermedias entre aquellos dos.

La operación por la que se obtiene un copolímero a partir de dos monómeros distintos, se denomina *copolimerización* y es uno de los procedimientos más utilizados en la técnica de los materiales plásticos para obtener materiales de especiales características; algunas veces, se ha comparado la copolimerización con la aleación de los metales. Como ejemplo, podemos citar el siguiente: el poliacetato de vinilo, obtenido por polimerización del acetato de vinilo, se ablanda a muy baja temperatura (de 30 a 40° C) y es poco resistente a los disolvente; por el contrario el policloruro de vinilo, que se obtiene por polimerización del cloruro de vinilo, tiene un alto punto de reblandecimiento, lo que dificulta su conformado, pero es muy resistente a los disolventes. Mezclando los dos monómeros citados (acetato de vinilo y cloruro de vinilo) en adecuadas proporciones, y polimerizando la mezcla, se obtiene el copolímero denominado policloroacetato de vinilo que se puede conformar fácilmente y, además es muy resistente a la acción de los disolventes; es decir, que se suman las cualidades del poliacetato de vinilo y del policloruro de vinilo.

Como hemos visto, en un copolímero hay dos clases de monómeros. Si los monómeros entran en la cadena sin un orden previo, se obtiene un *copolímero al azar* (Fig. 65). Si se unen cadenas de un polímero a cadenas de otro polímero, según sea el punto de enlace, se obtiene *copolímeros en bloque* (Fig. 66) o *copolímeros injertados* (Fig. 67).

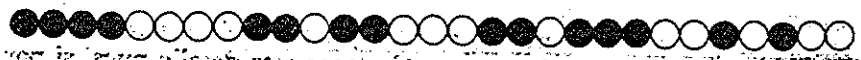


Fig. 65.—Copolímero al azar.

Fig. 66.—Copolímero en bloque.

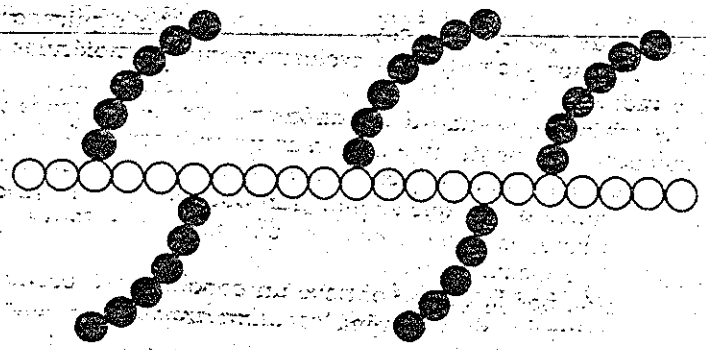


Fig. 67.—Copolímero injertado.

Despolimerización

Se denomina *despolimerización* al proceso inverso de la polimerización, es decir, a la descomposición del material plástico por la acción de agentes exteriores.

Para procurar que un material plástico conserve sus propiedades debe evitarse la despolimerización, por adición de productos que contrarresten la acción de los agentes destructivos. Así, por ejemplo, se emplean los antioxidantes para evitar la despolimerización lenta que provoca el oxígeno atmosférico.

Todos los plásticos se descomponen o despolimerizan cuando se someten a la acción del calor, y al alcanzar una temperatura determinada, denominada *temperatura de descomposición*.

Algunos plásticos, al despolimerizarse por estar sometidos a temperaturas elevadas, desprenden sustancias químicas, que unas veces son el monómero constituyente y otras veces se trata de productos químicos, como el cloro. Por ejemplo, el policloruro de vinilo, muy utilizado en aplicaciones electrotécnicas, al arder desprende cloro, gas de color amarillo verdoso, de olor picante y de efectos perjudiciales para la salud. Es interesante destacar este detalle pues, si por ejemplo, se trata de un cable eléctrico, aislado interiormente con polietileno y con un recubrimiento exterior de policloruro de vinilo, a causa de un cortocircuito podría empezar a arder la primera capa de polietileno, pero el cloro desprendido por el policloruro de vinilo impediría la propagación de la llama, ya que el cloro tiene la propiedad de impedir la combustión.

Sustancias aditivas

Hasta ahora, solamente se ha hablado de los plásticos como productos puros, constituidos solamente por los elementos químicos que constituyen el polímero (carbono, hidrógeno, cloro, etc.). Es decir, solamente se ha hablado del material básico o *resina sintética* que constituye el plástico propiamente dicho. Las resinas sintéticas o polímeros, se obtienen industrialmente en forma de polvos o gránulos y con ellos se fabrican, mediante los procedimiento que se estudiarán más adelante, los artículos de plástico de diversas formas y colores. Pero en la composición de la mezcla con que se fabrican estos artículos, además del polímero propiamente dicho, intervienen otras materias denominadas en general, *aditivos* que modifican o refuerzan de alguna forma las propiedades de la resina sintética. Queda claro, por lo tanto, que un artículo de plástico está constituido, principalmente por la resina sintética y, además, por otros productos, que se denominan aditivos; creemos que se habrá advertido la diferencia que existe entre resina sintética y plástico.

Son muchas las sustancias que se utilizan como aditivos. Unas u otras se emplean según la finalidad a que se destine el material elaborado; así, por ejemplo, si se quiere obtener un buen aislante eléctrico, no deberá mezclarse grafito, sustancia conductora que, en otras circunstancias, constituye un buen aditivo.

De todos los productos que intervienen en la composición de los plásticos, el más importante, el elemento básico es, como hemos dicho, la *resina sintética*, llamada también *aglutinante* del material plástico. Así, en el *polietileno*, citado como ejemplo en un parágrafo anterior, el polietileno, combinación de carbono e hidrógeno $[CH_2 = CH_2]_n$, es el aglutinante o elemento principal y cualesquiera que sean los aditivos que se le añadan, el plástico se denominará *polietileno*, y se representará por la fórmula ya conocida.

Los demás productos que intervienen en la mezcla y a los que hemos llamado *aditivos*, se clasifican en los grupos siguientes:

1. *Cargas.* Se utilizan para introducir en los plásticos nuevas propiedades, o para modificar algunas de las ya existentes. Muchas veces, se emplean también como material de relleno con objeto de abaratar el coste del artículo, ya que las cargas son más económicas que el aglutinante. Algunas cargas corrientes (por citar sólo las más empleadas) son: harina de madera, grafito, pizarra, mica, talco, amianto, corcho, desperdicios de cuero, fibra de vidrio, caolín, fibras textiles, celulosa, etc.

2. *Plastificantes.* Son materias que proporcionan a los plásticos características de elasticidad y de flexibilidad. Actúan a modo de lu-

bricantes internos introduciéndose y llenando los espacios libres existentes entre moléculas.

3. *Estabilizadores.* Su misión es contrarrestar los efectos de los agentes destructivos exteriores, evitando la despolimerización del material plástico; como ejemplo de estabilizadores, se pueden citar las sustancias antioxidantes, que evitan la acción del oxígeno del aire atmosférico.

4. *Endurecedores.* Estas sustancias aceleran el endurecimiento de los plásticos o aumentan la dureza de los mismos.

5. *Disolventes.* Se introducen entre las moléculas sólidas de los plásticos, disolviéndolas. El efecto que se obtiene es semejante al de los plastificantes, citados anteriormente, pero su acción es más enérgica, ya que convierten el material plástico sólido en líquido. Se utilizan, sobre todo, para la fabricación de barnices aislantes a partir de resinas sintéticas.

6. *Lubricantes.* Se utilizan para evitar que, durante su fabricación, las piezas se peguen a los moldes o demás elementos utilizados en su manipulación. Suelen ser aceites, ceras, parafinas, etc. que se mezclan con la resina, o bien se aplican directamente sobre los moldes.

7. *Colorantes.* Como indica su nombre, son las sustancias que dan color y vistosidad a los artículos fabricados con materiales plásticos. Además de cumplir esta función estética, muchos de ellos, los denominados *pigmentos*, actúan también como cargas. Algunos de estos pigmentos, como los llamados *negros de humo* actúan simultáneamente como colorante, como carga (reforzando las propiedades mecánicas) y, finalmente, como estabilizadores contra el envejecimiento.

Generalidades sobre la fabricación de los plásticos

Las mezclas resultantes de la polimerización, con las sustancias aditivas correspondientes, se presentan en el mercado en forma de polvo y gránulo de moldeo, que constituyen la materia prima del plástico. En los sucesivos parágrafos se estudiarán los procesos de fabricación de los materiales plásticos para que los lectores de esta obra sepan cómo se obtienen estos artículos, por ejemplo, cuando se dice que los cables aislados con plástico se obtienen por extrusión, es

interesante conocer lo que significa esta palabra y de qué forma se obtiene el cable aislado por este procedimiento de fabricación. Naturalmente, no es posible estudiar todos los procesos de fabricación de los plásticos, dados los límites y orientación de la presente obra; solamente se pasará revista a los más interesantes para el profesional electricista y aún éstos, de forma resumida.

Preparación de los plásticos

Antes del proceso de fabricación propiamente dicho, el aglutinante, en forma de polvo o de gránulos, ha de mezclarse, lo más íntimamente posible, con las cargas, los plastificantes, los colorantes, etc., es decir, con los materiales que hemos denominado *aditivos*. Para ello, se emplean máquinas mezcladoras especiales que, esencialmente constan de una tolva por donde se echan los materiales que se han de mezclar, y de un tornillo, sinfín de doble movimiento, giratorio y alternativo, donde se realiza la mezcla correspondiente.

Procedimientos de fabricación de los plásticos

Después de mezcladas las sustancias aglutinantes y las sustancias aditivas, deben dárseles las formas deseadas. Una veces, serán tubos, planchas, cintas, etc.; en otras ocasiones, serán objetos de dimensiones y características adecuadas.

Los procedimientos de fabricación que se utilizan, son muy variados, y se pueden clasificar tal como se expresa a continuación:

1. Moldeo
   - *a)* Compresión
   - *b)* Transferencia
   - *c)* Inyección
   - *d)* Extrusión
   - *e)* Insuflación
   - *f)* Colada
2. Calandrado
3. Revestimiento
4. Conformación

Seguidamente, se procederá a un estudio abreviado de cada uno de estos procedimientos de fabricación.

Fabricación de plásticos por moldeo

En las operaciones de *moldeo*, una cantidad controlada de material plástico, es colocada en un molde, antes o después de ser sometida a la acción del calor, enfriada después, y retirada finalmente del molde con la forma definitiva.

El producto así obtenido, será un duplicado exacto de la cavidad del molde, con todos los detalles, aún el acabado de la superficie; por lo tanto el molde se ha de construir lo más perfectamente posible y con materiales que resistan las altas temperaturas y presiones a las que estarán sometidos. Generalmente se emplean aceros de alta calidad que, muy frecuentemente, están cromados para defenderlos de la oxidación y la corrosión.

Por lo menos, los moldes están divididos en dos piezas: una de ellas tiene la forma exterior del artículo que va a ser fabricado, mientras que la otra pieza tiene la forma interior del artículo hueco o, en otras ocasiones es, simplemente, un pistón impulsor.

El *moldeo por compresión* se emplea, sobre todo, para dar forma a plásticos termoendurecibles (es decir, los que solamente pueden moldearse una vez, como veremos más adelante); los materiales termoplásticos (que se pueden moldear varias veces), también pueden trabajarse de esta forma pero con el inconveniente de que los moldes deben ser calentados y enfriados alternativamente lo que alarga el tiempo de fabricación.

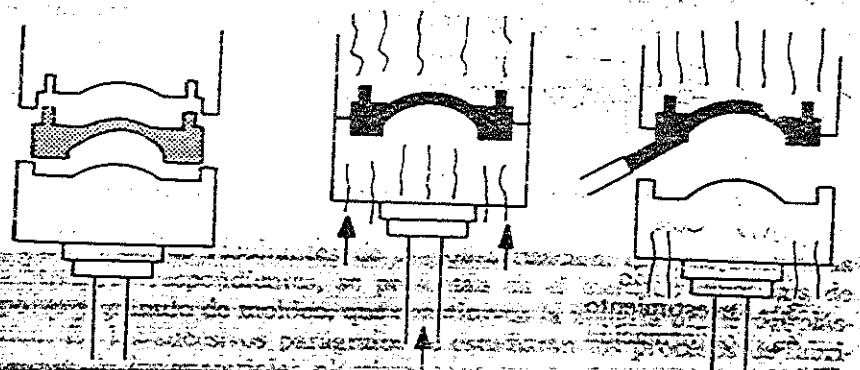


Fig. 68.—Moldeo de materiales plásticos por compresión.

En el moldeo por compresión (Fig. 68), se aplica simultáneamente, calor y presión. El calor transforma los polvos de moldeo en estado plásico y la presión obliga al material a llenar completamente el molde. Después se abre el molde, y se retira la pieza ya terminada.

El equipo empleado comprende, esencialmente, una prensa hidráulica, necesaria para conseguir las altas presiones requeridas y un sistema de calefacción apropiado por gas, vapor, electricidad, etc. Modernamente existen equipos de moldeo por compresión completamente automáticos, que realizan todas las operaciones sin necesidad de vigilancia alguna.

El *moldeo por transferencia* se emplea exclusivamente para plásticos termoendurecibles. El equipo utilizado es exactamente igual que en el moldeo por compresión. La única diferencia entre estos dos procedimientos está en la forma en que son cargados los moldes. Hemos visto que en el moldeo por compresión, los moldes eran cargados con los materiales plásticos en polvo; en el moldeo por transferencia, el material se plastifica fuera del molde y, ya en estado plástico, se vierte en este último donde se somete a alta presión. De esta manera, se pueden hacer piezas más exactas y de formas más complicadas que en el moldeo por compresión.

En el *moldeo por inyección* (Fig. 69), el plástico se calienta en una cámara de calefacción hasta su reblandecimiento y después se inyecta sobre el molde correspondiente, a través de una boquilla; este procedimiento se emplea exclusivamente para materiales termoplásticos.

Esencialmente, y tal como se expresa en la figura 69 el plástico,

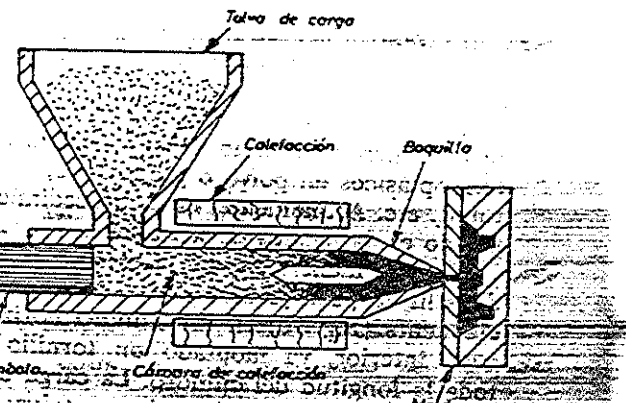


Fig. 69.—Moldeo de materiales plásticos por inyección.

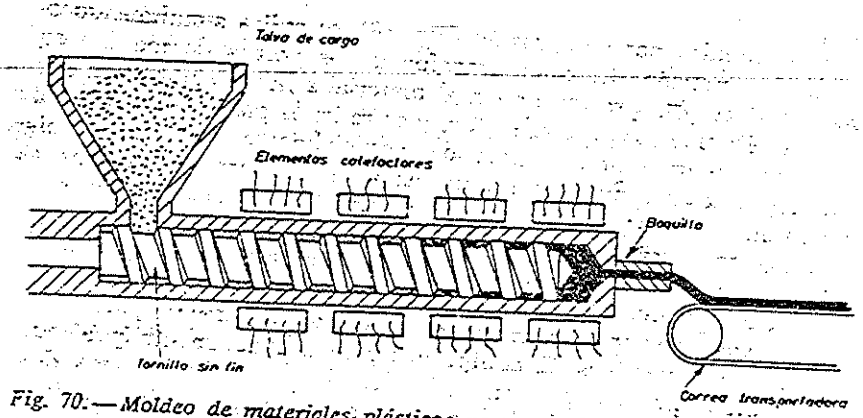


Fig. 70.—Moldeo de materiales plásticos por extrusión.

en polvo o granulado, se carga en una tolva, desde la cual cae la cantidad calentada, en una cámara caliente, situada frente a una prensa hidráulica, generalmente de émbolo horizontal. Una vez preparado el molde el émbolo presiona sobre el material y le hace atravesar la cámara de calefacción, donde se plastifica; después, a través de la boquilla, cruza el bebedero del molde, hasta llenar las cavidades de este último. El molde está convenientemente refrigerado, para que el material se enfríe rápidamente y puedan separarse las dos partes del molde, sacando la pieza ya terminada. En algunos modernos equipos de inyección el émbolo cilíndrico ha sido sustituido por un tornillo sinfín, con lo que se consigue una mezcla más uniforme del material plastificado y, por lo tanto, mejor calidad de las piezas terminadas y mayor capacidad de producción.

El moldeo por inyección se presta mejor que el moldeo por compresión a la automatización y, además, el ciclo de trabajo es mucho más corto.

El *moldeo por extrusión*, a diferencia de los anteriores, es un procedimiento continuo de fabricación, para convertir los materiales termoplásicos en polvo o granulados, en planchas, películas, varillas, tubos, etc. Actualmente, es el procedimiento de fabricación más empleado en la técnica de los plásticos. (Ver gráfica 70)

De una manera burda, la extrusión puede compararse a la forma de salir la pasta dentrífica del tubo que la contiene. Consiste esencialmente (Fig. 70) en un cilindro horizontal calentado y hueco, en cuyo interior va montado un tornillo sinfín, que se extiende en toda la longitud del cilindro. La carga de plástico en polvo se introduce en el cilindro a través de una tolva; ya en el interior del cilindro,

es plastificada por efecto del calor y forzada a avanzar, por el movimiento del tornillo sinfín, hacia el extremo opuesto del cilindro, donde existe una boquilla de forma adecuada y que conforma el plástico en la forma deseada: planchas, tubos, etc. Como a la salida de la boquilla, el plástico está aún caliente y blando, debe depositarse sobre una correa transportadora, que se lleva el material a la misma o mayor velocidad con que es expedido por la boquilla. Puede acelerarse el endurecimiento del producto extruído, por inmersión en agua o por enfriamiento en aire.

El moldeo por extrusión permite también la automatización de los equipos correspondientes; y resulta esencial el control de temperaturas a lo largo del cilindro y de la velocidad del tornillo sinfín, de acuerdo con la clase de material que se ha de fabricar.

El moldeo por extrusión es particularmente interesante para el electricista, ya que se emplea para el aislamiento de conductores eléctricos con diversos materiales termoplásticos: polietileno, policloruro de vinilo, etc.

El *moldeo por insuflación* se utiliza, sobre todo, cuando quieren fabricarse artículos huecos de plástico, tales como botellas y recipientes varios. El procedimiento utilizado es muy parecido al de la fabricación del vidrio. El principio básico del moldeo por insuflación (Fig. 71), consiste en formar un tubo hueco por inyección o extrusión, calentándolo e inflándolo en un molde, por medio del vapor o de aire caliente a presión, y enfriándolo después con aire frío. Finalmente, se saca del molde el objeto ya fabricado.

Algunos plásticos (por ejemplo, ciertas resinas fenólicas) admiten el *moldeo por colada*, de manera análoga a la empleada en los metales, es decir, vertiendo el material fluidificado en un molde abierto y sin aplicación de presión; en este caso no es necesario emplear temperaturas muy altas (generalmente, inferiores a 70° C). El enfriamiento es lento y el perfil del molde se reproduce con exactitud, obteniéndose productos muy bien acabados cuando el molde está

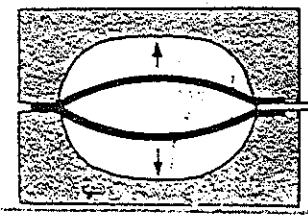


Fig. 71.—Moldeo de materiales plásticos por insuflación.

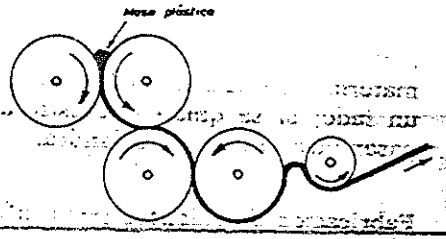


Fig. 72.—Calandrado de materiales plásticos.

pulimentado. Por otra parte, es un procedimiento lento y que resulta caro, por lo que sólo es aplicable a fabricación de pequeñas series.

Fabricación de plásticos por calandrado

Cuando, a partir de materiales termoplásticos, se precisa obtener el producto acabado en forma de láminas o películas, puede emplearse el procedimiento de fabricación por *calandrado*. La calandra para plásticos (Fig. 72) consiste esencialmente en cuatro grandes y pesados cilindros rotativos. Entre los cilindros se deposita la masa plástica caliente; el plástico sale de estos dos rodillos como una lámina, que entonces se hace pasar entre el segundo y el tercer rodillo y, después, entre el tercero y el cuarto rodillo, para conseguir el espesor deseado.

Los rodillos están construidos casi siempre de hierro y la superficie puede ser lisa o rugosa; generalmente, están calentados al vapor para mantener el material en el límite de plasticidad deseado, y están accionados por un motor eléctrico, a través de engranajes de reducción. Actualmente, se construyen cilindros hasta 90 cm de diámetro y, 2,5 m de ancho, con los que se pueden obtener láminas de espesores hasta de una milésima de milímetro.

La lámina que sale de la calandra se pasa después sobre 4 ó 5 rodillos enfriadores y, finalmente, se enrolla en una máquina adecuada.

La calandra es una máquina muy costosa pero que permite la producción de grandes cantidades de plásticos en láminas.

Fabricación de plásticos por revestimiento

El procedimiento de fabricación por *revestimiento* consiste en adherir una delgada capa de material plástico sobre una materia textil, un papel, etc. Esta operación se realiza también en una calandra, análoga a la explicada en el parágrafo anterior. Entre los dos últimos rodillos, se hace pasar el material que se ha de revestir, junto con la lámina de plástico procedente de los dos primeros rodillos. El material que sale de la calandra tendrá capa de material plástico a un lado; si se quieren revestir ambos lados, la lámina tendrá que pasar otra vez por la calandra.

Fabricación de plásticos por conformación

Se denomina *conformación* a la operación que consiste en dar forma apropiada a un objeto, a partir de una lámina de material

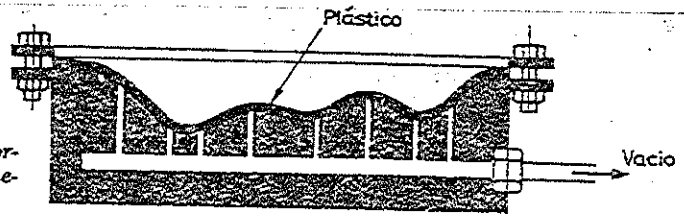


Fig. 73. — Conformación de materiales plásticos.

plástico. Las láminas termoplásticas pueden deformarse cuando se calientan y luego enfriarse para que conserven su nueva forma.

Generalmente, estas láminas se sujetan por los bordes sobre el molde (Fig. 73) y se reblandecen con el calor. Para poner la lámina reblandecida en contacto con la superficie del perfil deseado, se hace el vacío, extrayendo el aire existente entre la lámina y el molde por unos orificios situados en la parte inferior. La presión atmosférica oprime la lámina sobre el molde, obteniéndose de esta forma una reproducción bastante buena del mismo.

Se fabrican tipos especiales de láminas de policloruro de vinilo, polietileno, acetato de celulosa, etc., para su empleo por conformación por medio del vacío.

Aplicaciones de los plásticos en Electrotecnia

La más importante y casi única aplicación de los materiales plásticos en Electrotecnia se encuentra en su empleo, como aislantes o dieléctricos, función que cumplen perfectamente hasta el punto de que, en la actualidad, son los materiales aislantes más utilizados en baja tensión y, cada día son más interesantes sus aplicaciones como aislantes en los campos de las medias y aún altas tensiones.

Queda, por lo tanto, fuera de toda duda, la gran importancia actual de los materiales plásticos en el campo de la Electrotecnia; y por el desarrollo de la tecnología de estos materiales, puede predecirse que esta importancia será creciente en el futuro.

10 Estudio de los materiales plásticos empleados en electrotecnia

Clasificación de los materiales plásticos

Ante la complejidad de materiales plásticos utilizados en aplicaciones electrotécnicas, nace la necesidad de clasificarlos, para lo que se ha recurrido a diferentes criterios.

Uno de estos criterios es clasificar a los plásticos, según su proceso de polimerización, en los dos grupos siguientes:

a) *plásticos de adición*
b) *plásticos de condensación*

Recuérdese, del capítulo anterior, que se llama *polimerización por adición* o *poliadición* aquélla en que un monómero se une a otro y éste, a su vez, a un tercero y así sucesivamente, constituyendo la cadena polimérica. Y *polimerización por condensación* o *policondensación* a aquélla en que un monómero reacciona con otro monómero distinto para producir un tercer monómero, que es el que se repite a lo largo de la cadena polimérica.

Para nuestro propósito, nos ha parecido más apropiada la clasificación de los materiales plásticos según el criterio de su comportamiento al calor, en dos grandes grupos:

a) *materiales termoplásticos*
b) *materiales termoestables*

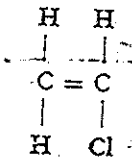
Los *materiales termoplásticos* se reblandecen con el calor y se endurecen cuando se enfrían; estas operaciones pueden repetirse in-

definidamente, sin que estos materiales pierdan sus propiedades, lo que permiten moldearlos repetidas veces. Pueden compararse a las ceras, que pueden ser moldeadas indefinidamente, sometiéndolas a la acción del calor.

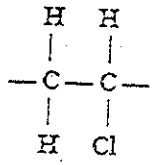
Los *materiales termoestables*, llamados también *materiales termofraguantes*, *materiales termoendurecibles*, etc., solamente son blandos o "plásticos" al calentarlos por primera vez. Después de enfriados, ya no se ablandan por un nuevo calentamiento y, por consiguiente, no pueden recuperarse para posteriores transformaciones, lo mismo que sucede al hormigón, después de fraguado.

Existe un tercer grupo de materiales plásticos que pueden ser termoplásticos o termoestables, según sus condiciones de obtención, algunos de los cuales son muy importantes en Electrotecnia, como se verá en momento oportuno.

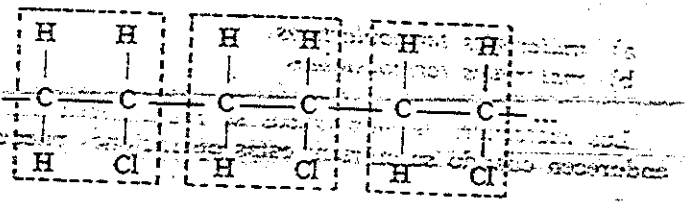
Los materiales termoplásticos tienen estructura lineal, es decir, en cadena; existen uniones sencillas entre las moléculas del monómero correspondiente, que dan origen a la formación del polímero o macromolécula por poliadición. Tomemos, por ejemplo, el cuerpo denominado *cloruro de vinilo*, cuya fórmula desarrollada es la siguiente



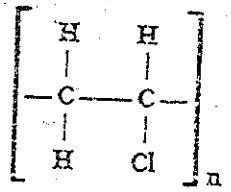
y cuyo monómero es



Este cuerpo polimeriza por unión lineal de *n* monómeros, es decir, de la forma siguiente:

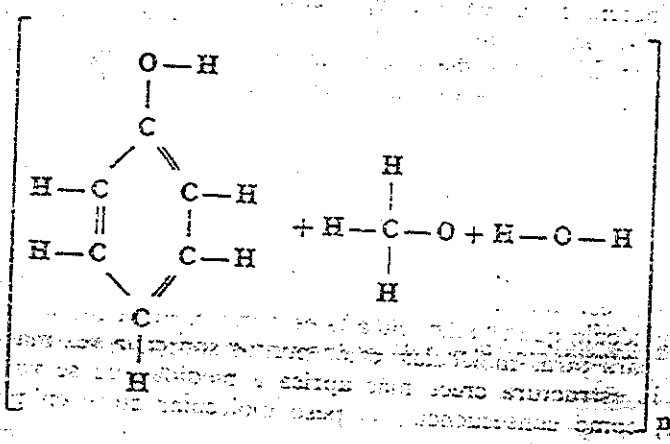


y su fórmula general es

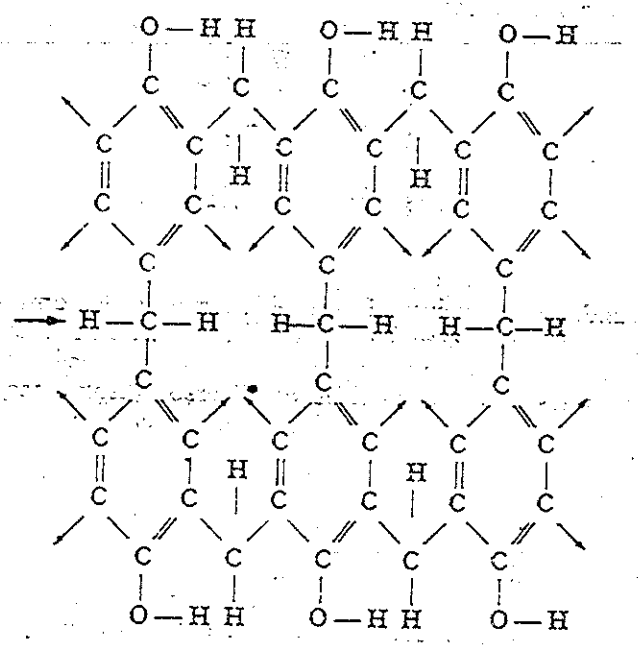


A causa de estos enlaces sencillos, los materiales termoplásticos pueden fundirse fácilmente sin que el cuerpo se descomponga y, al enfriarse nuevamente, adquiere otra vez su estructura y características anteriores. También por causa de los enlaces sencillos, los materiales termoplásticos son solubles en diversos disolventes, como el benceno, ya que las moléculas del disolvente penetran entre las macromoléculas, causando primero un hinchamiento y después la disolución completa.

Por el contrario, los materiales termoestables tienen estructura reticular tridimensional, es decir, que constituyen una red con enlaces transversales. Estos materiales se producen casi siempre por policondensación. Como ejemplo, tomemos la baquelita, tan conocida de los electricistas; se produce por reacción entre el fenol y el formaldehido, según la siguiente reacción:



Fenol Formaldehido Agua



Baquelita

Cualquiera de los enlaces representados pueden saturarse con otra molécula de monómero o, en otro caso, con un átomo de hidrógeno además, en las tres dimensiones del espacio. Para formar este polímero reticulado, debe aportarse calor a la reacción anteriormente indicada. La formación de enlaces transversales entre las cadenas adyacentes proporciona una estructura compacta, dura y difícilmente fusible; los plásticos de este tipo son insolubles en la mayor parte de los disolventes conocidos, ya que las moléculas del disolvente no pueden penetrar en el material sólido, separando las moléculas del polímero: esto se debe a su estructura reticular tridimensional, aun cuando la estructura total sea, en realidad, una sola molécula. Como cada molécula que se adiciona a la estructura ofrece nuevos puntos de enlace para otras moléculas, estos puntos son cada vez más numerosos y la estructura crece más aprisa a medida que se va haciendo mayor; como consecuencia, su peso molecular crece en proporción geométrica.

En las operaciones de fabricación de los materiales termoestables, éstos suelen moldearse inicialmente dándoles la forma del objeto acabado, colocando los ingredientes incompletamente polimerizados en el molde y calentando hasta que la reacción sea completa; al contrario que los materiales termoplásticos, los cuales se echan en el molde en estado fundido, y después han de enfriarse hasta el estado sólido antes de abrir el molde. Como los materiales termoestables se endurecen con el calor, también se les llama, como se ha dicho anteriormente, materiales termoendurecibles.

Materiales termoplásticos

Hemos definido anteriormente los *materiales termoplásticos* como los que adquieren plasticidad por simple calentamiento y vuelven a tomar su dureza al enfriarse, pudiendo realizarse estas operaciones tantas veces como se quiera.

Los materiales termoplásticos permiten la obtención de objetos de todas formas, generalmente, inyectando el material caliente en un molde frío o tibio, del cual toma forma al enfriarse. También pueden obtenerse, por extrusión, piezas de sección constante y longitud ilimitada, tales como barras, tubos, etc. Por este mismo procedimiento se puede incluso recubrir piezas de pequeña sección y gran longitud, especialmente conductores eléctricos, a los que se aísla con un recubrimiento de material termoplástico.

Las clases y variedades de materiales termoplásticos existentes en el mercado son innumerables y, generalmente, todos ellos son más o menos buenos aislantes eléctricos. Solamente se describirán algunos de ellos, los más utilizados en las aplicaciones eléctricas.

Recuérdese que también se indicó en un parágrafo anterior que algunos materiales plásticos pueden actuar según las características de obtención, como termoplásticos o como termoestables e incluso, como se verá, algunos de ellos pueden actuar como elastómeros. En todos los casos, estos materiales se citarán y estudiarán en los estados (termoplásticos, termoestables, elastómero) en que su empleo es más utilizado.

Para el estudio de los materiales termoplásticos que se inicia a continuación (y también para el estudio de los materiales termoestables que se realizará más adelante), no hemos seguido una clasificación rígida, por la gran diversidad de materiales existentes, ~~sino que solamente~~ se describen los más importantes de estos materiales, es decir, los que tienen mayor aplicación en Electrotecnia.

Caseína

La *caseína*, como material plástico, fue patentado en 1885. Llegó a tener cierta importancia, pero su desarrollo no progresó como el

de otros materiales plásticos, debido a sus dificultades de fabricación en gran escala.

Es un polímero, derivado de la leche, constituido principalmente por carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y fósforo. Se obtiene a partir de la leche desnatada, libre de grasas y azúcares; modernamente, se produce también a partir de las semillas de la soja. Se trata de una resina termoplástica cuando está algo húmeda, pero se transforma en material termoestable por reacción con el formaldehido (*caseína-formaldehido*, conocida comercialmente con el nombre de *Galalita*).

Tiene color blanco amarillento, entre traslúcido y opaco; su aspecto es muy parecido al cuerno. Destaca su facilidad de mecanizado, pulimento y brillo. Presenta, en cambio, malas cualidades de moldeo. Admite todos los colores, sin limitación. El agua, a una temperatura de 80 a 90° C, la reblandece, pero recobra su rigidez al enfriarse.

Tiene buenas propiedades dieléctricas para bajas tensiones. También tiene buenas propiedades mecánicas. Como desventaja, cabe citar su higroscopicidad, es decir, que absorbe el agua. Se colorea a la luz solar, y los agentes atmosféricos la endurecen. Es prácticamente ininflamable, pero puesta a la llama arde lentamente, con llama amarilla, humo gris y olor a pluma quemada; al arder, se hincha y carboniza. Resiste bien a los ácidos, aceites, disolventes, etc.; por el contrario, es atacada por los álcalis.

Actualmente, y en lo que se refiere a aplicaciones electrotécnicas, ha sido casi totalmente sustituido su empleo por otros materiales termoplásticos más modernos y de mejores propiedades eléctricas, físicas y químicas.

Termoplásticos derivados de la celulosa

Todos los materiales plásticos derivados de la celulosa son termoplásticos y se producen partiendo de la *celulosa* como materia prima y se obtienen partiendo del algodón o de la pulpa de madera, sustancias ricas en celulosa, y tratadas químicamente. En los plásticos celulósicos no es necesaria la polimerización, ya que la celulosa está formada por macromoléculas constituidas por cadenas de 2 000 a 3 000 moléculas de glucosa.

Los compuestos resultantes pueden obtenerse fácilmente en láminas, hojas u otras formas; son fuertes, flexibles, transparentes y con buenas propiedades aislantes. A continuación, se describen los más importantes plásticos celulósicos.

Nitrocelulosa. La *nitrocelulosa* o *nitrato de celulosa* se prepara por la acción de una mezcla de ácidos sulfúrico y nítrico sobre celulosa, llevándose la nitración para la obtención del plástico, hasta el 12 % del nitrógeno. Una vez obtenida la nitrocelulosa, en forma de polvo blanco, se plastifica con *alcanfor* en solución alcohólica, obteniéndose una masa transparente, ligeramente amarilla, que puede colorearse añadiendo pigmentos; este producto se conoce comercialmente con el nombre de *celuloide*.

El celuloide, obtenido a partir de la nitrocelulosa, tiene excelentes propiedades mecánicas: es un material muy tenaz, de gran resistencia a los choques y a la tracción. Se moldea muy fácilmente a temperaturas comprendidas entre 80 y 130° C, pudiendo reducirse a láminas muy finas. Tiene, además, buenas propiedades dieléctricas. Pero el celuloide tiene el gran inconveniente de ser muy inflamable, lo que ha limitado su empleo cuando se ha podido disponer de otros materiales de características similares pero no inflamables.

Acetato de celulosa. Actualmente, es el más importante material plástico derivado de la celulosa. Se obtiene por la acción del anhídrico acético sobre la celulosa, en presencia del ácido sulfúrico, que actúa como catalizador.

Es un material transparente, muy tenaz y resistente al choque aunque resulta ligeramente higroscópico. Tiene propiedades similares a las del celuloide pero como es incombustible ha sustituido a dicho material en casi todas sus aplicaciones electrotécnicas. Su facilidad de moldeo permite la fabricación de artículos muy económicos, de todas formas y tamaños. Puede mezclarse con plastificantes, en proporciones que varían entre 20 y 70 % de la resina propiamente dicha, así como con pigmentos y colorantes, obteniéndose características variables. Es resistente a los agentes químicos (aceite de transformador, disolventes, etc.).

Sus características aislantes son bastante buenas aunque las pérdidas dieléctricas resultan algo elevadas, por lo que no resulta material apropiado para ser utilizado como aislante en aplicaciones de alta frecuencia (telegrafía, radio, televisión, etc.).

Se conoce abreviadamente por las iniciales *A. C.* Se emplea para la fabricación de la seda artificial y como aislante de recubrimiento de conductores de pequeña sección (hilos para bobinados, por ejemplo).

Algunas denominaciones comerciales: *Celite, Celoma, Fibestos, Hércules C/A, Lumarith, Masurón, Nixonite, Plastacele, Rodoide, Tenite I, Trolita W.*

Acetobutirato de celulosa. Fue preparado por primera vez en 1932

para mejorar las propiedades del acetato de celulosa. Se obtiene por la acción de una mezcla de anhidrido acético y ácido butírico sobre la celulosa, en presencia del ácido sulfúrico, que actúa como catalizador.

Es un material blanco, que puede variar de transparente a opaco. Posee excelentes cualidades de moldeo, por inyección y extrusión, y puede colorearse sin limitación. Resiste a los agentes atmosféricos y a los rayos solares. Los ácidos y álcalis fuertes lo descomponen; los débiles, ligeramente. Es ligeramente inflamable ~~y arde con llama amarilla oscura, azulada en los bordes, que no se extingue por sí misma~~. Su velocidad de combustión es lenta. Desprende humos negros. Funde y gotea mientras arde.

Sus propiedades mecánicas y eléctricas son similares a las del acetato de celulosa, con la ventaja de que resulta menos higroscópica, ya que admite menos de la mitad de agua que dicho material, en inmersión prolongada.

Abreviadamente, se le suele denominar *A. B. C.*

Este material debe proscribirse en las aplicaciones en que deba ir en contacto con dieléctricos líquidos clorados (transformadores aislados con piraleno, por ejemplo).

Etilcelulosa. Este material apareció en 1912, pero su fabricación industrial no se inició hasta 1936. A pesar de su lento desarrollo inicial, posteriormente ha adquirido una gran importancia.

Se prepara por la acción del hidróxido sódico sobre la celulosa. Después, la celulosa alcalina obtenida se hace reaccionar con cloruro de etilo, cuyo radical etílico reemplaza al sodio, formándose la *etilcelulosa*.

Es de color blanco y muy estable al calor y a la luz. Posee gran estabilidad dimensional. Se funde en contacto con aceites, ceras y resinas. Sus propiedades eléctricas son superiores a las de otros plásticos celulósicos. Es estable al agua álcalis y agentes atmosféricos y soluble en disolventes. Conserva su dureza y flexibilidad dentro de un gran margen de temperaturas. Arde fácilmente, ~~con llama amarillenta y de bordes azulados que no se extingue por sí misma~~. Funde y gotea mientras arde. Su aspecto es parecido al lacre. Resulta fácilmente mecanizable.

Se presenta en forma de polvos de moldeo, películas y piezas moldeadas, y entra en la composición de diversas lacas y barnices aislantes.

En forma de película se emplea en el aislamiento de motores eléctricos y sustituye con ventaja al papel en el aislamiento de aparatos de baja tensión. La flexibilidad y resistencia de las tiras de etilcelulosa facilitan su empleo en el aislamiento de transformadores.

La plasticidad térmica y la resistencia a los aceites minerales de este material hacen que, estando en forma de cinta enrollada, pueda calentarse el aislamiento en un baño de aceite a presión, transformándose, por fusión, en un material aislante compacto y homogéneo, de excelente propiedades dieléctricas.

Los materiales preparados a base de etilcelulosa se utilizan, sobre todo, en la fabricación de conductores aislados y de tubitos aislantes. Para la primera aplicación, se deposita la película de etilcelulosa por extrusión sobre el conductor y se endurece inmediatamente por enfriamiento, sin perder la flexibilidad.

Se le conoce abreviadamente por las siglas *E. C.*

Este material debe proscribirse en todas las aplicaciones en que deba ir en contacto con dieléctricos líquidos clorados como sucede, por ejemplo, con los transformadores aislados con piraleno.

Una de las propiedades más interesantes de la etilcelulosa es su resistencia a las bajas temperaturas, ya que conserva íntegramente sus propiedades mecánicas a temperaturas de −50° C. Algunas denominaciones comerciales: *Chemaco, Ethocel, Hércules E. C., Lumarith E. C., Trolita B. C.*

Resinas de cumarona

Estas resinas se obtienen a partir de productos neutros de la destilación fraccionada de la hulla, los cuales se tratan con ácido sulfúrico, ácido fosfórico o cloruro alumínico. La polimerización se realiza al aire libre o bajo presión, a temperaturas variables según los procedimientos, entre 60° y 120° C.

Las *resinas de cumarona* son de color claro y su dureza varía con el procedimiento empleado para su polimerización y, también, con la naturaleza de los compuestos tratados. Con el empleo de soluciones ácidas concentradas se obtienen resinas duras y poco solubles, mientras que las soluciones diluidas proporcionan resinas blandas.

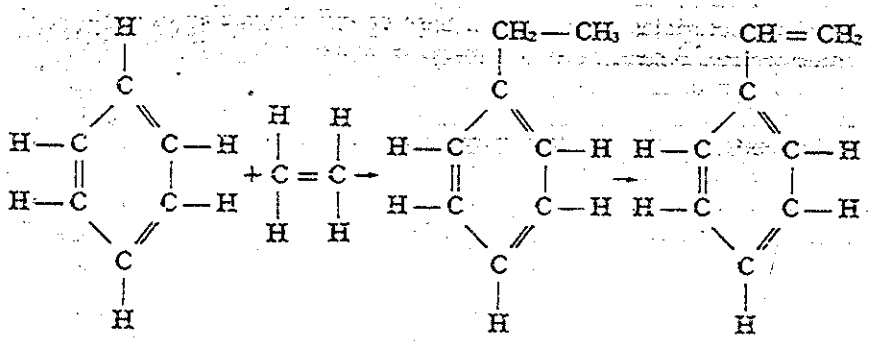
Son solubles en los disolventes orgánicos (benceno, tolueno, etc.) y se emplean, sobre todo, en la fabricación de barnices y de piezas moldeadas.

Resinas poliestirénicas

Las *resinas poliestirénicas* se obtienen partiendo del etilbenceno; son polimerizables por el calor y transparentes como el vidrio.

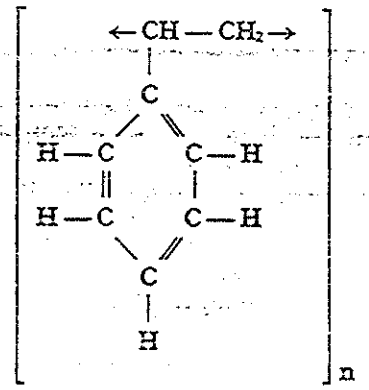
La más conocida de estas resinas es el material denominado *poliestireno* o *poliestireno*, al que nos vamos a referir principalmente en

nuestra explicación. Se obtiene por polimerización del estireno o *fenileteno;* las principales fases de las reacciones químicas hasta obtener el monómero correspondiente, se expresan a continuación:

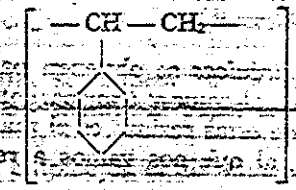


Benceno Etileno Etilbenceno Estireno

El estireno obtenido se somete a polimerización por calentamiento; la fórmula general del poliestireno es



o, más abreviadamente



El poliestireno es uno de los materiales termoplásticos más ampliamente utilizados. Se despolimeriza por la acción del calor, como los demás termoplásticos. Ha encontrado una extensa difusión como dieléctrico, gracias a su precio económico y a sus notables cualidades. Esta resina ya se conocía el siglo pasado pero su desarrollo comercial se produjo durante la segunda guerra mundial en que por necesitarse el estireno en grandes cantidades para la fabricación de caucho sintético se abarató su producción.

Cuando se prepara a temperatura ambiente es elástico, resistente, difícil de romper y de pulverizar; si la preparación de este material se hace a 250° C, se quiebra más fácilmente y puede reducirse a polvo.

Es muy estable dimensionalmente. Se distingue por su facilidad de moldeo por inyección, su bajo peso específico y sus extraordinarias cualidades eléctricas, especialmente a altas frecuencias, superiores a las de otros plásticos corrientes. Su higroscopicidad es casi nula, por lo que conserva sus buenas propiedades eléctricas de resistencia de aislamiento y de rigidez dieléctrica, en atmósferas húmedas.

Es químicamente inerte; resulta inatacable por los álcalis, las soluciones acuosas de la mayor parte de los electrolitos y los ácidos minerales diluidos; además no presenta ningún efecto de envejecimiento. Es soluble en los hidrocarburos clorados y la mayor parte de las acetonas.

Tan extraordinarias propiedades eléctricas, físicas y químicas, unidas a su baratura, harían del poliestireno el dieléctrico perfecto si no fuera por su bajo punto de reblandecimiento (unos 85° C), la falta de constancia absoluta en sus características eléctricas y la dificultad de obtener productos rigurosamente idénticos.

Se han realizado numerosos ensayos, encaminados a eliminar o reducir estos inconvenientes, a base de introducir cargas especiales u otros productos químicos, o variando los procesos de polimerización, habiéndose logrado obtener algunos resultados positivos. Según los distintos procesos de polimerización del estireno monómero, solo o copolimerizado con otros monómeros, o con adición de determinados aditivos, se obtienen diferentes clases de poliestireno. En cada una de estas diferentes variedades se ha procurado mejorar una característica determinada. Así, por ejemplo, se dispone actualmente de varios tipos de poliestireno: uno de aplicación general, otro que es estable a la luz, otro especialmente resistente al choque, otro resistente al calor, otro de gran resistencia química, etc., y que permiten su aplicación en multitud de casos en que es determinante la característica por la que se denomina.

El poliestireno es ligeramente inflamable, ardiendo con llama amarilla y desprendimiento de humo.

El poliestireno se emplea para el aislamiento de conductores eléctricos y constituye el compuesto principal de barnices aislantes y de impregnación para aplicaciones radiotécnicas. Para la mayor parte de estas aplicaciones, hay que agregarle plastificantes para aumentar su alargamiento y su flexibilidad; el porcentaje de plastificantes debe ser pequeño, para evitar la alteración de sus cualidades mecánicas.

Algunas denominaciones comerciales: *Cerex, Chemaco, Dylene, Dystrene, Loalin, Lustron, Polystirol, Rhodolene, Ronilla, Styramic, Styrofoam, Styron, Styropor, Trolitul.*

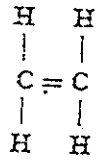
A continuación, y por la importancia que tiene este material en la industria eléctrica, se exponen en una tabla las principales características del poliestireno.

TABLA 31. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLIESTIRENO

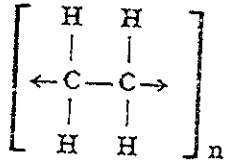
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,05
	Carga de rotura en kg/cm²	500
	Alargamiento a la rotura en %	1
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	60
	Temperatura de deformación, en °C	80-90
	Punto de reblandecimiento, en °C	104-116
	Absorción de agua en 48 horas, en %	0
	Resistencia a la llama	Moderada
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	Superior a 10^{17}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	20-30
	Constante dieléctrica ε a 50 Hz	2,5 a 2,6
	Constante dieléctrica ε a 1 MHz	2,6 a 2,7
	Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz	1 a 3 × 10^{-4}
	Factor de pérdidas (tg δ) a 1 MHz	3 a 8 × 10^{-4}
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Excelente
	Resistencia a la humedad	Excelente
	Resistencia a las radiaciones ultravioletas del Sol	Buena
	Resistencia a los aceites y grasas minerales	Excelente
	Resistencia a los ácidos minerales y orgánicos diluidos	Excelente
	Resistencia a los álcalis diluidos	Excelente
	Envejecimiento	Nulo

Polietileno

Se recordará que, al principio de este capítulo se hizo referencia al *polietileno* (P. E.), tomándolo como ejemplo sencillo para la explicación de la formación de los polímeros. Efectivamente, por su estructura, el polietileno es el polímero más sencillo. Se parte del etino o etileno



y se obtiene el polietileno por polimerización, en las condiciones que se explicarán más tarde. La fórmula general del polietileno es



Desde el punto de vista de sus cualidades eléctricas, es uno de los más importantes materiales termoplásticos. Su empleo se extiende cada vez más y se considera que, en un futuro próximo, se convertirá en el primero de los plásticos, en atención a sus cifras de producción y consumo.

Durante muchos años, se realizaron innumerables experimentos para lograr convertir el etileno (monómero del polietileno) en combustible líquido para motores. En estas investigaciones se interesó la firma británica *Imperial Chemical Industries Ltd.* (I. C. I.) y si bien no consiguió obtener el buscado combustible líquido, obtuvo, en cambio, un nuevo plástico, que lleva ahora la marca comercial de *Alkathene.* El nuevo plástico, polietileno, no se produjo industrialmente hasta 1939 en Inglaterra y, posteriormente, en Alemania y Estados Unidos, bajo diferentes y numerosas marcas.

La obtención del polietileno presentaba serias dificultades, ya que debía efectuarse a altas presiones, del orden de 1 000 a 1 500 atmósferas y temperaturas de unos 300° C, hasta que, en 1953, el profesor Ziegler, en Alemania, consiguió obtener polietileno a presión atmosférica y temperaturas muy inferiores a la indicada anteriormente. Estos dos procedimientos de polimerización del etilenomonómero producen otros tantos diferentes tipos de polietileno, llamados respectivamente:

a) polietilenos de baja densidad y alta presión
b) polietilenos de alta densidad y baja presión

El polietileno es menos denso que el agua y es el más ligero de los plásticos utilizados en Electrotecnia. Es un material sólido, incoloro, traslúcido, graso al tacto, blando en pequeños espesores, siempre flexible, inodoro y no tóxico. Tiene un aspecto similar al de la parafina y ciertas analogías con la gutapercha.

Se descompone a unos 300° C. Sin plastificantes, se reblandece a 115° C, debiendo señalar que su punto de fusión está muy próximo al de reblandecimiento, por lo que se recomienda no utilizarlo para temperaturas superiores a 80° C.

Cuando deba someterse a prolongadas exposiciones a la intemperie, deben añadirse estabilizadores, especialmente antioxidantes, que le proporcionan mayor resistencia frente al oxígeno y la conocida acción destructiva de los rayos ultravioletas de la luz solar, que provocan el endurecimiento del material y una disminución de sus cualidades eléctricas y mecánicas. Afortunadamente, los antioxidantes en uso son de absoluta eficacia durante un período muy prolongado.

Es muy resistente a la humedad, de la que absorbe menos del 0,005 %. Se ha comprobado que piezas moldeadas en polietileno sumergidas durante siete días en agua, no experimentan ningún aumento de peso. Conserva esta interesante propiedad, incluso a altas temperaturas.

Es totalmente inerte a los disolventes. Sin embargo, a temperaturas próximas a 70° C empieza a disolverse en benceno, tolueno, tricloroetileno, xileno, tetracloruro de carbono y aceites minerales. Posee también una excelente resistencia a la corrosión de tal forma que delgadas cintas de polietileno fueron sumergidas durante unas horas en ácido nítrico y clorhídrico concentrados y 50 % de sosa cáustica, sin sufrir ninguna alteración. Es uno de los plásticos más resistentes a los agentes químicos que se conocen actualmente.

Presenta excelentes propiedades eléctricas, especialmente a altas frecuencias, ya que conserva un factor de potencia sensiblemente constante a frecuencias comprendidas entre 50 y 5 000 000 de Hz. Las pequeñas variaciones que puede presentar el factor de potencia como consecuencia de la oxidación atmosférica, se corrigen con la adición de los ya mencionados antioxidantes, cuyo empleo resulta absolutamente necesario en las mezclas destinadas a la fabricación de cables. El hecho de que haya sido admitido para aislamiento de cables conductores, a pesar de su relativamente bajo punto de reblandecimiento, demuestra hasta qué punto son buenas sus propiedades eléctricas. Mediante la adición de cargas de negro de humo, puede mejorarse su resistencia al calor y a la luz. Posee además la gran

ventaja, ya indicada, de ser siempre flexible, sin necesidad de plastificantes.

A bajas temperaturas se vuelve algo quebradizo, lo que se puede evitar copolimerizándolo con un elastómero, el isobutileno que, en proporción de un 10 %, le comunica gran flexibilidad. Estos copolímeros de etileno e isobutileno tienen gran aplicación en la industria eléctrica, especialmente en la fabricación de cables que han de someterse a bajas temperaturas.

Arde entre fácil y moderadamente, con ligero resplandor, con llama azul en la parte baja y amarilla en la parte alta. Funde y gotea mientras arde. Huele a parafina quemada.

Su empleo es universal en la industria eléctrica, utilizándose como aislamiento de cables de transporte de energía y para telecomunicación, cables submarinos, y aparatos electrodomésticos.

Algunas denominaciones comerciales: *Alkathene, Hostalen, Polythene, Dylan, Trolen.*

A continuación, se resumen en una tabla las más importantes características del polietileno.

TABLA 32. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLIETILENO (CARGADO CON NEGRO DE HUMO)

CARACTERISTICAS FISICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	0,92
	Carga de rotura en kg/cm²	125
	Alargamiento a la rotura en %	400
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	70
	Temperatura de fragilidad, en °C	— 30
	Resistencia a la llama	Arde
CARACTERISTICAS ELECTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{18}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	30
	Constante dieléctrica ε a 50 Hz	2,3
	Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz (entre — 20 °C y + 80 °C)	$2 \text{ a } 5 \times 10^{-4}$
CARACT. QUIMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Muy buena
	Resistencia a la humedad	Excelente
	Resistencia a aceites y grasas minerales	Mediana

Polietileno reticulado. El *polietileno reticulado* (P. R. C.) es un material resultante de las tentativas de eliminar la condición termoplástica del polietileno, aumentando de esta forma las temperaturas de trabajo y de fusión del material. Laboriosos estudios y pruebas llevaron a descubrir agentes y procesos que podían desarrollar en el polietileno, enlaces intermoleculares estables, convirtiéndolo en un material termoestable; aunque estos procesos de fabricación permanecen, en gran parte, secretos, se puede decir que para conseguir la reticulación intermolecular se incorporan previamente al polietileno ciertos peróxidos orgánicos que provocan la formación de los enlaces intermoleculares. En cierto modo, la reticulación es comparable a la vulcanización de un elastómero (proceso del que se habla en el capítulo correspondiente) ya que se proporciona al producto tratado la propiedad de fundirse a alta temperatura, sin reblandecimiento previo; por esta razón al polietileno reticulado se le conoce también con el nombre inapropiado de "polietileno vulcanizado".

Cabe distinguir el polietileno reticulado sin carga, de características dieléctricas semejantes a las del polietileno termoplástico y el polietileno reticulado cargado con negro de humo, en que las propiedades dieléctricas quedan ligeramente disminuidas, pero en el que sus propiedades mecánicas y estabilidad a la intemperie quedan notablemente reforzadas.

El polietileno reticulado admite perfectamente temperaturas de trabajo de unos 90° C, pudiendo alcanzar en casos de emergencia y durante corto tiempo, hasta 130° C sin que la estructura del aislamiento quede afectada. Alrededor de los 300° C, se carboniza sin previa fusión. Estas excelentes características térmicas, junto a las propiedades eléctricas superiores a las que poseen la mayor parte de los materiales aislantes, convierte al polietileno reticulado en el material idóneo para constituir el aislamiento de cables expuestos a fuertes puntos de carga, o bien en instalaciones a temperaturas ambientales elevadas o con escasa refrigeración.

En la página siguiente se exponen en una tabla las más importantes características técnicas de este material, aun muy moderno.

Resinas vinílicas

Las *resinas vinílicas* son productos de reacciones entre el eteno o etileno, cuya fórmula estructural es

$$CH_2 = CH_2$$

con diversos cuerpos, como resultado se obtienen nuevos cuerpos,

TABLA 33. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLIETILENO RETICULADO (CARGADO CON NEGRO DE HUMO)

CARACTERISTICAS FISICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,14
	Carga de rotura a 20 °C, en kg/cm²	150
	Alargamiento a la rotura en %	200
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	90
	Temperatura de fragilidad, en °C	— 20
	Resistencia a la llama	Moderada
	Resistencia a la abrasión	Excelente
	Resistencia a las flexiones repetidas	Buena
	Resistencia a la compresión	Muy buena
	Resistencia al frío	Excelente
CARACTERISTICAS ELECTRICAS	Resistencia de aislamiento, en MΩ. Km	10 000
	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{16}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	15
	Constante dieléctrica ε a 50 Hz	5
	Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz y 20 °C	1×10^{-2}
CARACTERISTICAS QUIMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Excelente
	Resistencia a la humedad	Excelente
	Resistencia a las radiaciones ultravioletas del Sol	Excelente
	Resistencia a los aceites y grasas minerales	Excelente
	Resistencia a las soluciones diluidas de ácidos minerales y orgánicos	Muy buena

por sustitución de uno o más de los átomos de hidrógeno del etileno por diferentes radicales. Estos nuevos cuerpos, debidamente activados, son los monómeros de las diferentes resinas sintéticas. Con varios ejemplos, se entenderá esto que decimos.

Por reacción del etileno con el *ácido clorhídrico* cuya fórmula es

$$Cl\,H$$

se obtiene el *cloruro de vinilo*, cuya fórmula estructural es

$$CH_2 = CH$$
$$|$$
$$Cl$$

es decir, que se trata de la sustitución de un átomo de hidrógeno en la fórmula del etileno, por un átomo de cloro. El cloruro de vinilo activado es el monómero constituyente del *policloruro de vinilo*, cuya fórmula general sería, por tanto

$$\left[\begin{array}{c} \leftarrow CH_2 - CH \rightarrow \\ | \\ Cl \end{array}\right]_n$$

Por reacción del etileno con el *ácido acético*, cuya fórmula estructural es

$$CH_3 - COOH$$

se obtiene el *acetato de vinilo*, cuya fórmula estructural es

$$\begin{array}{c} CH_2 = CH \\ | \\ OOC - CH_3 \end{array}$$

El acetato de vinilo activado es el monómero que constituye el *poliacetato de vinilo*, cuya fórmula general es

$$\left[\begin{array}{c} \leftarrow CH_2 - CH \rightarrow \\ | \\ OOC - CH_3 \end{array}\right]_n$$

De la misma forma, por reacción del etileno con el *ácido butírico*, cuya fórmula estructural es

$$CH_3 - CH_2 - CH_2 - COOH$$

se obtiene el butirato de vinilo que tiene la siguiente fórmula estructural

$$\begin{array}{c} CH_2 = CH \\ | \\ OOC - CH_2 - CH_2 - CH_3 \end{array}$$

El butirato de vinilo activado es el monómero constituyente del *polibutirato de vinilo*, cuya fórmula general es la siguiente

$$\left[\begin{array}{c} \leftarrow CH_2 - CH \rightarrow \\ | \\ OOC - CH_2 - CH_2 - CH_3 \end{array}\right]_n$$

Si en el etileno se sustituye un átomo de hidrógeno por el radical —OH, llamado *hidroxilo*, se obtiene el *alcohol vinílico*, cuya fórmula estructural es

$$\begin{array}{c} CH_2 = CH \\ | \\ OH \end{array}$$

Este cuerpo constituye el monómero del plástico, denominado *polialcohol vinílico* y cuya fórmula general es

$$\left[\begin{array}{c} \leftarrow CH_2 - CH \rightarrow \\ | \\ OH \end{array}\right]_n$$

Finalmente, con la sustitución de dos átomos de hidrógeno por dos átomos de cloro, se obtiene el *cloruro de vinilideno*, cuya fórmula estructural es

$$\begin{array}{c} CH_2 = C \\ | \\ Cl_2 \end{array}$$

y que constituye el monómero del *policloruro de vinilideno*, que tiene la siguiente fórmula general

$$\left[\begin{array}{c} \leftarrow CH_2 - C \rightarrow \\ | \\ Cl_2 \end{array}\right]_n$$

Los cuerpos que hemos citado son las resinas vinílicas más importantes utilizadas en la industria eléctrica. Además de los polímeros, se emplean también diversos copolímeros para reunir, en un mismo compuesto, las propiedades más interesantes de dos o más polímeros. Por ejemplo, pueden mejorarse las propiedades mecánicas del policloruro de vinilo, mezclándolo, en proporciones adecuadas, con poliacetato de vinilo que, por otra parte, no puede u...izarse sólo a causa de su bajo punto de reblandecimiento. De esta forma, se obtienen diversos copolímeros de ambos cuerpos, cuya fórmula general varía según la cantidad de monómeros de uno y otro cuerpo; por ejemplo, la fórmula general del copolímero de 50 % de policloruro de vinilo y de 50 % de poliacetato de vinilo sería

$$\left[\begin{array}{c} \leftarrow CH_2 - CH \\ | \\ Cl \end{array} \begin{array}{c} CH_2 - CH \rightarrow \\ | \\ OOC - CH_3 \end{array}\right]_n$$

Cloruro de vinilo Acetato de vinilo

A continuación, y excepto el policloruro de vinilo material del que se realiza un estudio más detallado en el próximo parágrafo, se describen brevemente las características y propiedades de las resinas vinílicas que hemos citado.

Poliacetato de vinilo. Llamada también *acetato de polivinilo*, fue descubierta en 1912, comprobándose posteriormente su facilidad de polimerización e introduciéndose comercialmente a partir de 1929.

Es incoloro, inodoro e insípido. Puede presentarse transparente u opaco, duro y tenaz. Es muy resistente a la fatiga. Posee malas cualidades de moldeo pero excelentes propiedades eléctricas, elevada resistencia al arco y buena estabilidad a la luz y al calor. Es resistente a los ácidos y álcalis diluidos y soluble en los disolventes.

Arde fácil y lentamente con llama de color amarillo oscuro y humo negro.

A pesar de sus buenas cualidades eléctricas y mecánicas no se utiliza directamente para aplicaciones electrotécnicas, debido a su bajo punto de reblandecimiento (38° C). Sin embargo, sí se emplean diversos copolímeros en los que el acetato de polivinilo mejora las características mecánicas o eléctricas del compuesto resultante; por ejemplo, el denominado *Vinyon*, constituido por 89 % de cloruro de vinilo y 11 % de acetato de vinilo, es un material muy elástico y resistente, que ha resistido ensayos de hasta 3 millones de flexiones y alargamientos de hasta 500 % y que se emplea para recubrimiento de conductores eléctricos.

El poliacetato de vinilo constituye además el material básico para la fabricación de la seda artificial o *rayón*, utilizada como aislamiento de hilos para bobinados.

Polibutirato de vinilo. Es un material muy resistente y estable al calor que se emplea, sobre todo, en copolímeros con el policloruro de vinilo, para mejorar las propiedades mecánicas de éste. También se utiliza para revestimiento de conductores eléctricos.

Polialcohol vinílico. Esta resina fue descubierta en 1927. Se obtiene a partir del poliacetato de vinilo, anteriormente citada, de la que se obtiene por hidrólisis, en presencia de un catalizador, por ejemplo, el ácido sulfúrico.

Se presenta en forma de polvo blanco, ligeramente amarillento. Tiene dos propiedades muy notables: es extraordinariamente resistente a los aceites, grasas y a la mayoría de los disolventes. Además, tiene la propiedad de que los tubos fabricados con este material transmiten el sonido sin apenas distorsión.

Por otra parte, tiene una gran resistencia a la tracción y a la

flexión y mejor resistencia a la abrasión que el caucho. Su resistencia también es excelente al oxígeno, al ozono y al envejecimiento. Es ligeramente inflamable y admite toda clase de colorantes y pigmentos.

Sus propiedades eléctricas son medianas, por lo que se emplea, principalmente, como mezcla para mejorar las propiedades mecánicas y químicas de otros materiales con mejores propiedades dieléctricas.

Policloruro de vinilideno. Llamado también *cloruro de polivinilideno*. Sus primeros datos proceden de 1922, empezando su fabricación industrial en 1939. Se obtiene clorando el etileno y tratando después con cal, el tricloroetileno formado. El cloruro de vinilideno formado se polimeriza fácilmente a temperaturas superiores a 0° C, obteniéndose un polvo blanco, que es el polímero correspondiente.

Es blanco amarillento, transparente u opaco, según los casos. Es insípido e inodoro. Resulta extraordinariamente resistente a los agentes químicos y disolventes y muy poco higroscópico. Con el tiempo se vuelve duro, tenaz y poco soluble. Es un buen aislante térmico. Puede decirse que, prácticamente no se quema; arde muy difícilmente, con llama amarilla de bordes verdosos y se ablanda desprendiendo color característico a cloro. Puede colorearse fácilmente y resulta fácilmente moldeable por compresión, inyección y extrusión. Tiene buenas propiedades dieléctricas.

A pesar de tan buenas propiedades, este material no se emplea solo, debido al inconveniente de su elevada temperatura de reblandecimiento, comprendida entre 85° C y 200° C, con muy poco margen de trabajo, pues a 225° C se descompone. Además, es incompatible con los plastificantes normalmente empleados en la técnica de los plásticos.

Estos inconvenientes se pueden corregir copolimerizando el cloruro de vinilideno con otros monómeros, como el cloruro de vinilo, en cuyo caso, el punto de reblandecimiento desciende a temperaturas comprendidas entre 120° y 140° C, según la composición de las mezclas. Los compuestos resultantes tienen buenas propiedades eléctricas, y excelentes propiedades mecánicas y químicas.

Policloruro de vinilo

El *policloruro de vinilo (P. V. C.)*, se denomina también *cloruro de polivinilo*. Su monómero, el cloruro de vinilo, fue descubierto en 1835 por el químico francés Regnault; este mismo científico descubrió también, poco después, el polímero, de forma casual, al haber dejado expuesto a la luz del día, un tubo de ensayo conteniendo monómero.

Sin embargo, hasta 1875 no se consiguió polimerizar el monómero en el laboratorio. Y hasta el año 1912 no se establecieron las condiciones de polimerización del cloruro de vinilo, que sirvieron de base al extraordinario desarrollo que habría de alcanzar después. Solamente faltaba solucionar un pequeño inconveniente: el polímero obtenido resultaba excesivamente rígido lo que no lo hacía apto para muchas aplicaciones industriales. Este problema quedó resuelto en 1932, con el descubrimiento del procedimiento de plastificación del policloruro de vinilo.

Las excelentes propiedades de este material, han impulsado de forma sorprendente su producción mundial, sus técnicas de polimerización y sus innumerables aplicaciones. En la actualidad, es el plástico más fabricado y de empleo más extendido en todo el mundo, no solamente en aplicaciones eléctricas, sino también en otras aplicaciones industriales, de construcción, domésticas, etc. Es decir, que es el más importante de todos los materiales plásticos.

Factor importante en la gran extensión del policloruro de vinilo ha sido también la abundancia y el módico precio de las primeras materias utilizadas para su fabricación. Fundamentalmente, se obtiene a base de acetileno, etileno, cloro y ácido clorhídrico. Se fabrica haciendo pasar una mezcla de acetileno y ácido clorhídrico en presencia de una sustancia catalizadora, por ejemplo, el cloruro de mercurio. Se obtiene el cloruro de vinilo, que es un cuerpo gaseoso; este cuerpo se polimeriza con ayuda de calor y de un catalizador.

Como aislante eléctrico, el policloruro de vinilo es ampliamente utilizado para la frecuencia industrial (50 Hz) pero no para altas frecuencias debido a que sus pérdidas dieléctricas resultan elevadas en estas condiciones; para cubrir todas las aplicaciones se emplean otros materiales como el poliestireno y el polietileno, anteriormente reseñados. También resulta un inconveniente el elevado factor de pérdidas dieléctricas para el empleo de este material en el campo de las muy altas tensiones ya que las pérdidas dieléctricas resultan proporcionales al cuadrado de la tensión de servicio y pueden adquirir valores considerables para las altas tensiones, en caso de aislamiento de cables de gran longitud. Actualmente, el policloruro de vinilo se utiliza para tensiones de servicio de hasta 20 kV.

El policloruro de vinilo es inodoro, insípido y no tóxico. Es insoluble en el agua. Resulta excepcionalmente resistente a los agentes químicos, tales como ácidos, álcalis, aceites, alcoholes, etc. Es también insoluble en los disolventes corrientes. Tiene gran resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico. Arde con dificultad y la llama se extingue por sí sola; la llama es de color amarillento, con tono grisáceo en el borde. Sin llegar a arder, se ablanda por la acción del calor y despide olor a cloro.

Sus propiedades mecánicas son, solamente medianas. Se suministra generalmente en forma de polvo blanco, transparente u opaco, aunque también se le encuentra en el comercio en forma de tubos, planchas, etc.

El polvo puede moldearse por inyección, extrusión y compresión y también puede trabajarse por calandrado, laminados de todas clases y estampaciones en relieve. El procedimiento más corriente es el moldeo por extrusión, dado que se emplea en grandes proporciones para el aislamiento de cables. También se emplea para el moldeo por inyección para la fabricación de diversos accesorios (tuberías aislantes, aparatos eléctricos, etc.).

Tiene gran facilidad para formar copolímeros y mezclas. Admite toda clase de cargas y plastificantes y puede ser coloreado sin limitación por los más diversos colorantes y pigmentos.

Tiene excelentes propiedades eléctricas, excepto en lo que se refiere a las pérdidas dieléctricas, tal como hemos dicho anteriormente.

Encuentra su principal utilización en el aislamiento de conductores eléctricos. Pero en la técnica de fabricación de cables eléctricos, el policloruro de vinilo duro no se podría utilizar por falta de flexibilidad y por su rápida degradación a bajas temperaturas, por lo que se le incorporan diversos aditivos, variables en cantidad y proporción de acuerdo con la función a que se destine el compuesto como producto final. Los aditivos agregados pueden afectar en alto grado las propiedades mecánicas y eléctricas del material básico, así como su comportamiento respecto a la elevación de temperatura. Cabe distinguir los siguientes compuestos a base de policloruro de vinilo:

— *Calidad normal:*
Temperatura máxima admisible . . . . . 50 a 60° C

— *Calidad resistente al calor:*
Temperatura máxima admisible . . . . . 80 a 100° C

— *Calidad resistente al frío:*
Conserva la ductilidad hasta . . . . . —30° C

— *Calidades especiales para diversas aplicaciones*

Además de como aislamiento de cables conductores para el transporte de energía eléctrica, donde ha invadido el campo de aplicación de la goma y otros aislantes, el policloruro de vinilo ha llenado prácticamente todo el campo de aplicación de aislamiento de conductores para el alambrado de aparatos electrónicos y, también, para cuadros de maniobra, distribución y medición a baja tensión, debido, entre

otras cosas, a la facilidad de diferenciar los diversos elementos de los circuitos, gracias al gran número de colores que pueden obtenerse, ya sea recubriendo directamente el conductor por extrusión, ya sea introduciendo tubos protectores de policloruro de vinilo.

El policloruro de vinilo rígido o ligeramente plastificado se emplea en gran escala en forma de tubos de protección de conductores sustituyendo al clásico tubo Bergmann. Estos tubos se caracterizan por sus excelentes cualidades eléctricas y mecánicas y por su inalterabilidad, así como por su facilidad de instalación. Se cortan fácilmente con navaja, sierra, etc. Se sueldan calentando sus extremos a la llama y uniéndolos a tope. Se curvan con gran facilidad, calentando la zona a curvar. Con el mismo material se construyen las cajas de empalme y de registro, codos y derivaciones, casquillos de empalme, abrazaderas y demás elementos de la instalación.

Otra de las interesantes aplicaciones del policloruro de vinilo consiste en la construcción de separadores para acumuladores, donde se emplea por su excelente resistencia a la acción de los ácidos.

Finalmente, y para terminar nuestra exposición, el policloruro de vinilo se emplea también profusamente en la construcción de aparatos y dispositivos eléctricos tales como terminales, enchufes, portaclavijas, etc.

En la tabla de la página siguiente, se expresan las más interesantes características de dos calidades de policloruro de vinilo: una *calidad blanda* en la que se han respetado, sobre todo, las características eléctricas y destinada a ser utilizada como aislamiento directo para cables subterráneos, y otra *calidad dura* en la que, por adición de cargas adecuadas, se han mejorado las propiedades mecánicas en detrimento de sus cualidades eléctricas, y que está destinada a cubierta exterior de cables subterráneos.

Algunas denominaciones comerciales: *Astralón, Chemaco, Geon 100, Glasspack, Igelita, Mipolam PVC, Rhodopas X, Vinidur, Vinylite Q, Welvic.*

Policloruro de vinilo reticulado. El *policloruro de vinilo reticulado (P. V. C. R.)* es un copolímero de cloruro de vinilo, en el que la síntesis se efectúa según un procedimiento adecuado que permite la posterior reticulación, la cual se realiza mediante la adición de peróxidos y agentes de enlace, consiguiendo de esta manera la formación de enlaces intermoleculares estables.

El proceso de reticulación convierte el material termoplástico primitivo, en un material termoestable, cuyas características mecánicas, especialmente la flexibilidad y la resistencia a la temperatura están considerablemente mejoradas respecto a las que corresponden al policloruro de vinilo normal.

TABLA 34. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE DOS TIPOS DE MEZCLAS DE POLICLORURO DE VINILO

	Características	Tipo de mezcla: Para aislamiento	Tipo de mezcla: Para cubierta
CARACTERISTICAS FISICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,3	1,33
	Carga de rotura en kg/cm²	170	150
	Alargamiento a la rotura en %	150	160
	Coeficiente de dilatación por °C	7×10^{-5}	20×10^{-5}
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	80	80
	Temperatura de fragilidad, en °C	— 20	— 20
	Resistencia a la llama	Se autoextingue	Se autoextingue
	Resistencia a la abrasión	Buena	Buena
CARACTERISTICAS ELECTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{15}	5×10^{14}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	40	35
	Constante dieléctrica a 20 °C, y 50 Hz	5	5
	Constante dieléctrica a 80 °C, y 50 Hz	7	7
	Factor de pérdidas (tg δ) a 20 °C y 50 Hz	9×10^{-2}	9×10^{-2}
	Factor de pérdidas (tg δ) a 80 °C y 50 Hz	4×10^{-2}	4×10^{-2}
CARACTERISTICAS QUIMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Excelente	Excelente
	Resistencia a la humedad	Buena	Muy buena
	Resistencia a soluciones ácidas diluidas	Muy buena	Muy buena
	Resistencia a soluciones de sales metálicas	Muy buena	Muy buena
	Resistencia a aceites y grasas minerales	Excelente	Excelente
	Resistencia a mohos y bacterias	Muy buena	Muy buena

Se emplea, sobre todo, para el aislamiento de cables, ya que este material reúne las siguientes ventajas respecto a los cables aislados con elastómeros o con policloruro de vinilo normal:

a) Superiores características mecánicas (carga de rotura, resistencia a la abrasión, resistencia a la compresión, etc.).
b) Mejor comportamiento a temperaturas elevadas.
c) Mayor resistencia a la oxidación por ozono y por oxígeno atmosférico, garantizando una eficaz protección de las zonas próximas a los puntos de conexión en las que los aislamientos de los conductores quedan sin cubierta.
d) Superior resistencia a los aceites minerales.
e) Resistencia a la propagación de la llama equiparable a la del policloruro de vinilo normal y, por tanto, muy superior a la de las gomas, que queman totalmente.

En la tabla que se expone a continuación, se expresan las más importantes características del policloruro de vinilo reticulado.

TABLA 35. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLICLORURO DE VINILO RETICULADO

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,37
Carga de rotura a 20 °C, en kg/cm²	110
Alargamiento a la rotura en %	300
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	30
Resistencia al frío	Buena
Resistencia a la humedad	Buena
Resistencia a aceites y grasas minerales	Buena
Resistencia a la llama	Se autoextingue

Resinas acrílicas

Las *resinas acrílicas* derivan del *ácido acrílico*, cuya fórmula estructural es

$$CH_2 = CH - COOH$$

Veamos a continuación la formación de las más importantes resinas acrílicas utilizadas en Electrotecnia.

A partir del monómero *metacrilato de metilo* cuya fórmula estructural es

$$CH_2 = \underset{\displaystyle COOCH_3}{\underset{|}{C}} - CH_3$$

se obtiene el polímero *polimetacrilato de metilo*

$$\left[\leftarrow CH_2 - \overset{\displaystyle CH_3}{\underset{\displaystyle COOCH_3}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}} \rightarrow \right]_n$$

Si el monómero que se toma como punto de partida es el *metacrilato de etilo*

$$CH_2 = \underset{\displaystyle COO - CH_2 - CH_3}{\underset{|}{C}} - CH_3$$

se obtiene el polímero *polimetacrilato de etilo*

$$\left[\leftarrow CH_2 - \overset{\displaystyle CH_3}{\underset{\displaystyle COO - CH_2 - CH_3}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}} \rightarrow \right]_n$$

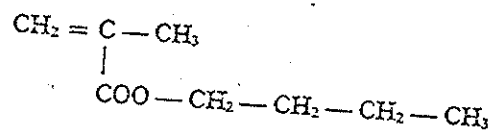
Si se parte del monómero *metacrilato de propilo*

$$CH_2 = \underset{\displaystyle COO - CH_2 - CH_2 - CH_3}{\underset{|}{C}} - CH_3$$

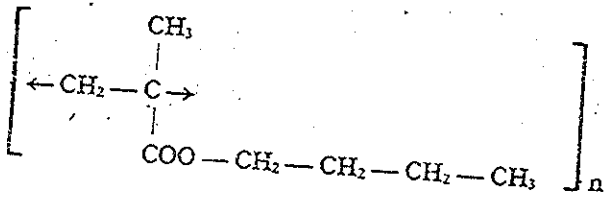
el polímero obtenido se denomina *polimetacrilato de propilo*:

$$\left[\leftarrow CH_2 - \overset{\displaystyle CH_3}{\underset{\displaystyle COO - CH_2 - CH_2 - CH_3}{\overset{|}{\underset{|}{C}}}} \rightarrow \right]_n$$

A partir del monómero *metacrilato de butilo*, de fórmula estructural



se obtiene el polímero denominado *polimetacrilato de butilo*



Los cuerpos citados son las resinas acrílicas de más aplicación en Electrotecnia. Estos productos se polimerizan fácilmente y se presentan en formas muy estables, incoloras y transparentes, siendo tal esta transparencia, que todos ellos pueden sustituir al vidrio, sobre el cual tienen las ventajas de su gran ligereza, su gran flexibilidad y su falta de fragilidad.

Estas resinas resisten perfectamente al agua y a los productos inorgánicos; son solubles en gran número de disolventes y compatibles con gran número de otras resinas.

Tienen excelentes propiedades eléctricas: su rigidez dieléctrica es elevada, pequeño su factor de potencia y tienen gran resistencia al arco. Estas cualidades, unidas a su excelente comportamiento ante el ozono y el oxígeno atmosférico y su neutralidad ante los aceites y grasas minerales, hace que se empleen estas resinas en el esmaltado y aislamiento de conductores eléctricos para bobinados y para líneas de transporte de energía eléctrica. También se emplean generalmente como barnices protectores de materiales eléctricos y como agentes de impregnación de los devanados de máquinas eléctricas y transformadores.

El mayor inconveniente de estas resinas es su elevado precio, por lo que su empleo como aislante queda limitado a algunos casos especiales. Ya veremos más adelante que algunos de estos materiales tienen otras importantes aplicaciones en Electrotecnia.

En la tabla de la página siguiente, se expresan las más interesantes características de estas resinas.

TABLA 36. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS ACRÍLICAS

Características	Material			
	Polimetacrilato de metilo	Polimetacrilato de etilo	Polimetacrilato de propilo	Polimetacrilato de butilo
Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,19	1,11	1,06	1,05
Temperatura de deformación, en °C	125	65	38	30
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	630	350	280	105
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	30	27	26	25
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,065	—	0,038	0,062

Polimetacrilato de metilo. Entre las resinas acrílicas tiene una importancia especial el polimetacrilato de metilo, llamado popularmente *Plexiglás* y que se empezó a fabricar en 1935, desarrollándose rápidamente su industrialización hasta la actualidad.

Es muy transparente, ~~con un índice de transmisión de la luz de 92 %~~ y con un peso específico que es, aproximadamente, la tercera parte del correspondiente al vidrio. No le afectan los cambios de temperatura y tiene excelentes propiedades mecánicas, con una resistencia al choque diez veces superior a la del cristal. Por último, tiene muy buenas propiedades dieléctricas.

Es muy fácil de moldear y de trabajar con sierra, taladro, etc.; tiene el inconveniente de que se raya con facilidad, aunque al pulirlo se restaura fácilmente.

Por todas estas excelentes cualidades, la principal aplicación del polimetacrilato de metilo está en Luminotecnia, para la construcción de toda clase de aparatos de alumbrado, tanto para exteriores como para interiores. Por esta razón, este material es de gran interés para los profesionales electricistas, ya que ha llegado a sustituir casi completamente al vidrio en las aplicaciones citadas.

Algunas denominaciones comerciales: *Diakón, Lucite, Perspex, Plexiglás, Plexigum, Plextol.*

Polipropileno

Es un plástico muy moderno, cuyo monómero es el *propeno* o *propileno*, de fórmula estructural

$$CH_3 - CH = CH_2$$

Este cuerpo debidamente activado, se polimeriza, obteniéndose el *polipropileno*, cuya fórmula general es la siguiente:

$$\left[CH_3 - \underset{\downarrow}{CH} - CH_2 \rightarrow \right]_n$$

El cuerpo resultante es incoloro o de coloración clara, muy ligero (peso específico, 0,9 gr/cm³), muy duro y con buena resistencia al choque y a la tracción. Tiene también excelentes propiedades eléctricas, gran resistencia a los agentes químicos y a los disolventes, a la temperatura ordinaria.

Se emplea en aislamientos eléctricos para cables. Algunas denominaciones comerciales: *Hostalen PPH, Moplen, Profax.*

Etileno-propileno

También es un material muy moderno. Se trata de un copolímero de polietileno y polipropileno; según varíe el contenido de uno u otro de estos dos materiales básicos, pueden variar también las características del cuerpo resultante, que van desde las de un termoplástico a las de un elastómero, con todas las propiedades de éste, excepto la vulcanización, que no debe realizarse con azufre sino con peróxidos orgánicos.

Se han desarrollado industrialmente dos tipos de etileno-propileno:

a) Copolímero de 50 % de polietileno y 50 % de polipropileno, siendo sus características las correspondientes a un elastómero vulcanizado.

b) Copolímero de 20 % de polietileno y 80 % de polipropileno, cuyas características corresponden a las de un termoplástico, con las ventajas del polipropileno frente a las temperaturas y las del polietileno en lo que hace referencia a la rigidez mecánica.

Este material puede emplearse como aislamiento de cables subterráneos y, en algunos casos como cubierta exterior de esos mismos

cables. Su empleo es muy reciente, aunque se prevé como posible sustituto de la goma butílica para todas las aplicaciones de ésta.

Como características más interesantes, se puede indicar que es resistente a los aceites y a los disolventes, es inflamable aunque de combustión lenta, pudiendo reducirse su combustibilidad por aplicación de unas cubiertas apropiadas de policloruro de vinilo.

Permite temperaturas de trabajo comprendidas entre −70° C y +85° C, manteniendo buena flexibilidad dentro de esta gama.

Es particularmente resistente a los efectos provocados por la ionización del aire, pudiendo considerarse notablemente superior al caucho butílico en este aspecto. Las restantes características eléctricas son parecidas a las del *caucho butílico* o *poliso butileno-isopreno*, material del que se habla en el capítulo dedicado a las aplicaciones de los elastómeros. Por consiguiente, las aplicaciones del etileno-propileno son similares a las de dicho material, pero ampliadas a las destinadas a alta tensión, debido a su resistencia a los efectos de la ionización del aire.

Policarbonatos

Estos modernos termoplásticos constituyen los primeros materiales de esta clase que incorporan el radical carbonato como parte constituyente de la cadena principal del polímero.

Son cuerpos transparentes, inodoros e insípidos. Tienen excelentes propiedades mecánicas, con gran resistencia al choque. Son totalmente inalterables al calor, a la luz, oxígeno y ozono y muy resistentes a los agentes químicos.

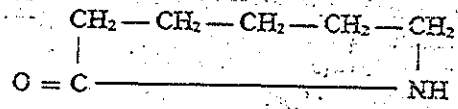
Tienen también buenas propiedades eléctricas.

Sin embargo, su más importante cualidad es que conservan todas las propiedades citadas hasta temperaturas de −140° C. Esta característica tiene un interés extraordinario en las aplicaciones electrotécnicas a muy bajas temperaturas: por ejemplo, en aplicaciones astronáuticas, en la fabricación de cables superconductores, etc.

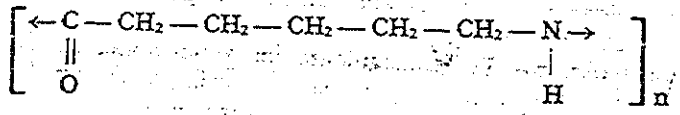
Poliamidas

Las *poliamidas* se encuentran en el mercado desde 1938 en que fueron presentadas como fibras con el nombre comercial de *Nylon*. Se diferencian entre sí por los compuestos de partida para su obtención; en todas ellas se parte de las amidas con grupos nitrilos (NH) y carboxilos (CO) y la disposición y número de estos elementos, distingue a los varios tipos de poliamidas. Por ejemplo, para el caso

del Nylon se parte de la amida denominada *caprolactama*, cuya fórmula estructural es



Por la acción del calor, se rompe el enlace entre el grupo carboxilo CO y el grupo nitrilo NH, con lo que resulta un monómero activado que, por polimerización produce la *policaprolactama*, más conocida con el nombre de *Nylon* y cuya fórmula general es



A pesar de los diversos procedimientos de obtención, todas las poliamidas presentan un conjunto de características comunes: son termoplásticas, de tipo fibroso, de aspecto lechoso y traslúcido. Resultan muy estables a los rayos solares y no sufren envejecimiento. Son tenaces, elásticas, flexibles, muy resistentes a la tracción, al choque y a la abrasión por lo que puede decirse que sus propiedades mecánicas son excelentes. Tienen buena resistencia a los agentes químicos, puesto que no las afectan la mayoría de los disolventes y son impermeables a los álcalis y a los detergentes. Como desventaja, ha de citarse su higroscopicidad. Poseen excelentes propiedades eléctricas. Pueden funcionar permanentemente en una gama de temperatura comprendidas entre −60° C y +110° C. Arde suavemente, con llama azul y se funde. Desprende olor a pelo quemado.

Algunas veces se refuerzan las poliamidas con fibra de vidrio, adquiriendo extraordinarias propiedades mecánicas y pudiendo entonces emplearse en aplicaciones que requieran gran esfuerzo a la tracción (en pozos de minas, por ejemplo), estabilidad dimensional y trabajo permanente en un amplio margen de temperaturas.

Generalmente, las poliamidas no se emplean en virtud de una sola característica sino por el conjunto de sus propiedades. Como es sabido, se emplean principalmente como fibra textil pero como sus propiedades eléctricas son excelentes, se emplean también en aquellos casos en que se requiere un material aislante que, además, haya de tener buenas propiedades mecánicas. Modernamente, se sustituyen los aislamientos de seda y de algodón, tan empleados anteriormente en los hilos para bobinados, por tejidos de Nylon que, una vez barnizados, presentan prácticamente las mismas cualidades que los anteriores, con ligera ventaja económica y mayor resistencia mecánica.

Las poliamidas pueden moldearse por inyección, extrusión, compresión y calandrado. Admiten plastificantes y colorantes sin limitación.

Se emplean como recubrimiento final o cubierta de cables eléctricos; esta cubierta es resistente al calor y a la abrasión. En el campo radiotécnico y telefónico también se han empleado las poliamidas: tornillos, soportes aislantes, etc. Asimismo, en la fabricación de aparatos electrodomésticos, en botones pulsadores, arandelas aislantes y multitud de piezas que a sus excelentes propiedades eléctricas, añaden su resistencia a sobrecalentamientos y su cualidad de irrompible. También en electricidad del automóvil se han fabricado cuadros de mando, pulsadores, etc., de poliamida.

Otro campo de empleo es en los cables para alta frecuencia, antenas de radio y de televisión, tendidos telegráficos, instalaciones telefónicas, etc.

Los cables aislados con poliamidas han encontrado gran aplicación en la industria de aparatos frigoríficos, por su elevada resistencia al frío y a los disolventes (gases líquidos) utilizados en esta industria.

TABLA 37. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS POLIAMIDAS (NYLON)

CARACTERISTICAS FISICAS	Peso específico a 20 °, en gr/cm³	1,1
	Carga de rotura, en kg/cm²	500
	Alargamiento a la rotura, en %	40
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	100
	Temperatura de fragilidad, en °C	— 50
	Resistencia a la llama	Mala
CARACT. ELECTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{12}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	25
	Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	5
	Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz y 20 °C	0,05
CARACT. QUIMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Buena
	Resistencia a la humedad	Buena
	Resistencia a aceites y grasas minerales	Buena

Finalmente, se puede añadir que, por pulverización con pistola, se pueden recubrir con poliamidas toda clase de superficies metálicas, con espesores variables, para muy diversas aplicaciones aislantes.

En la tabla anterior, se expresan las más interesantes características de las poliamidas.

Algunas denominaciones comerciales: *Amilan, Capron, Enkalon, Grilon, Igamida, Nylon, Perlon, Polymer R, Rilsan, Silon, Stelon, Teryiene.*

Poliuretanos

Estos materiales termoplásticos empezaron a desarrollarse en Alemania hacia los años cuarenta. En su composición química y propiedades tienen cierta semejanza con las poliamidas, estudiadas en el parágrafo anterior y desarrolladas, sobre todo, en América.

Estos materiales son atacados por los ácidos débiles y concentrados y por los álcalis concentrados. Ofrecen buen aislamiento eléctrico, térmico y acústico. Son moldeables por inyección y extrusión. ~~Arden lentamente, con llama azulada; funden y gotean mientras arden.~~ Su precio puede considerarse también similar al de las poliamidas.

Algunas denominaciones comerciales: *Klemoell, Lockfoam, Moltopren, Perlon U.*

Resinas fluoradas

Son materiales termoplásticos caracterizados por la sustitución, en la cadena molecular del polietileno, de los átomos de hidrógenos por átomos de fluor. Algunos de estos materiales contienen también átomos de cloro, con lo cual se introducen algunas variantes en sus características generales. Son de aparición muy reciente y tienen excepcionales propiedades físicas, mecánicas, eléctricas y físicas, aunque con el inconveniente de su elevado precio que limita sus aplicaciones. A continuación, se reseñan brevemente los más importantes de estos materiales.

Politetrafluoretileno. Por reacción del ácido fluorhídrico con el cloroformo se obtiene el monómero *tetrafluoretileno*, cuya fórmula estructural es

$$CF_2 = CF_2$$

que, debidamente activado, se polimeriza, obteniéndose el *politetrafluoretileno*, cuya fórmula general es

$$\left[\leftarrow \begin{matrix} F & F \\ | & | \\ C & - C \\ | & | \\ F & F \end{matrix} \rightarrow \right]_n$$

Fue descubierto en 1941, en los laboratorios de la *Du Pont de Nemours International* y fabricado en pequeñas cantidades unos cuatro años después, con el nombre comercial de *Teflon*. Se conoce abreviadamente con las siglas *P. T. F. E.*

Conserva las mismas propiedades físicas y químicas que el polietileno, con la particularidad de que la presencia de fluor le proporciona una excepcional resistencia a los agentes químicos.

Es traslúcido, blanco o grisáceo. Inalterable a la luz solar y a los agentes atmosféricos. Nula absorción de la humedad. Gran resistencia al envejecimiento por oxidación, especialmente a altas temperaturas. En funcionamiento permanente abarca una gama de temperaturas comprendida entre −55° C y +325° C, sin perder ninguna de sus propiedades. Se descompone a una temperatura de 450 a 500° C. No arde, pero se pone incandescente.

Presenta excelentes propiedades eléctricas, incluso a altas temperaturas y altas frecuencias. No lo atacan los ácidos ni los disolventes, ni siquiera a temperaturas elevadas; en cambio, sí pueden atacarlo los álcalis concentrados.

No es plastificable. Las propiedades mecánicas están afectadas por el grado de cristalinidad de su estructura. Las cargas mejoran su dureza y su resistencia a la compresión, pero perjudican sus propiedades eléctricas.

A pesar de tan excepcionales cualidades, actualmente no se emplea mucho en aplicaciones electrotécnicas generales a causa de su elevado precio (unas diez veces mayor que el del polietileno) que lo hacen prohibitivo para estas aplicaciones. Sin embargo, se emplea como aislamiento de conductores sometido a muy exigentes condiciones de funcionamiento y, en el campo de la alta frecuencia, para la fabricación de pequeñas piezas moldeadas y dieléctricos de condensadores cerámicos; en todos estos casos, se prevén altas temperaturas de funcionamiento.

En la siguiente tabla, se indican las más interesantes características de este material:

TABLA 38. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLITETRAFLUORETILENO (TEFLÓN)

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	2,2
	Carga de rotura, en kg/cm²	150
	Alargamiento a la rotura, en %	200
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	300
	Temperatura de fragilidad, en °C	— 50
	Resistencia a la llama	Incombustible
CARACT. ELÉCTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{15}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm²	30
	Constante dieléctrica ε a 50 Hz	2
	Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz y 20 °C	2×10^{-4}
CARACT. QUÍMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Excepcional
	Resistencia a la humedad	Excepcional
	Resistencia a los aceites y grasas minerales	Excepcional

Algunas denominaciones comerciales: *Algoflon, Fluon, Hostaflon TF, Teflon.*

Politrifluorcloroetileno. Este material fue descubierto en 1937, pero no se obtuvo en forma satisfactoria hasta que se puso en marcha el programa de energía atómica, durante la segunda guerra mundial, debido a la necesidad de disponer de materiales con alta resistencia química y térmica y en atmósfera de fluor. No se inició su fabricación comercial hasta 1947.

Su estructura química es muy parecida a la del politetrafluoretileno, pero sustituyendo en cada molécula un átomo de fluor por uno de cloro; o sea que su fórmula general es

$$\left[\begin{array}{c} F \quad F \\ | \quad\quad | \\ \leftarrow C = C \rightarrow \\ | \quad\quad | \\ F \quad Cl \end{array} \right]_n$$

Lo mismo que el anterior, tiene inmejorables cualidades, tanto eléctricas como mecánicas, químicas, térmicas, etc. A pesar de su elevado precio se van extendiendo sus aplicaciones, por su posibilidad de empleo donde otros materiales no resistirían ataques químicos o altas temperaturas. Tiene un gran valor en la industria eléctrica por su excepcional resistencia a la humedad, térmica y química, y por sus características eléctricas.

Se emplea como aislamiento de conductores eléctricos, para la fabricación de soportes de radar y antenas, etc.

Materiales termoestables

Se dijo en un parágrafo anterior que la característica más importante de los *materiales termoestables* (llamados también *materiales termoendurecibles, materiales termofraguantes,* etc.) es que pierden su plasticidad después de calentarlos por primera vez. Después de enfriados, ya no se ablandan por un nuevo calentamiento y resultan irrecuperables para nuevas transformaciones.

Al contrario de lo que sucede con los materiales termoplásticos (los cuales se ablandan con el calor), *los materiales termoestables se endurecen con el calor,* es decir, que cuando estos materiales se someten durante bastante tiempo a la acción de una temperatura conveniente, disminuye su solubilidad hasta anularse completamente; al mismo tiempo, se eleva su punto de fusión y pueden llegar a hacerse infusibles. Estas modificaciones estructurales van acompañadas de un aumento de peso molecular.

Recuérdese también, de un parágrafo anterior, que los materiales termoestables tienen estructura reticular tridimensional y que se producen casi siempre por policondensación, es decir, por reacción de dos monómeros, que producen un tercer monómero, el cual constituye la unidad que se repite en la red polimérica. Durante la operación de policondensación, se produce desprendimiento de agua o de otras sustancias y, además, se trata de una operación irreversible, es decir, que no se pueden recuperar los monómeros iniciales.

Los materiales termoestables se caracterizan por el hecho de que, hasta su temperatura de descomposición, tanto su forma y dimensiones como sus características mecánicas, varían poco por efecto de la temperatura.

A continuación se estudian los más importantes materiales termoestables que tienen aplicación en la industria eléctrica. Son menos numerosos que los materiales termoplásticos, estudiados anteriormente, pero algunos de ellos resultan de extraordinario interés en Electrotecnia.

Algunos de estos materiales, según las condiciones de fabricación, pueden ser termoestables o termoplásticos, pero se incluyen en el grupo de los termoestables porque en esta condición es como tienen mayores o más interesantes aplicaciones electrotécnicas.

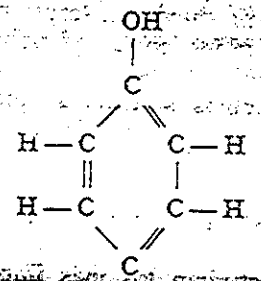
Resinas fenólicas

Las *resinas fenólicas*, también denominadas *fenoplastos*, son los materiales plásticos comúnmente conocidos con el nombre de *baquelitas*. Este nombre procede de su inventor, el belga Baekeland, quien fundó la compañía *Bakelite Corporation* en 1907, para la explotación industrial del nuevo producto.

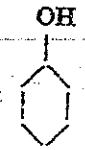
Los productos a base de baquelitas, han sido ampliamente utilizados como aislantes eléctricos. Han recibido, por sus aplicaciones eléctricas, numerosas modificaciones encaminadas a mejorar su calidad, sobre todo en lo referente a la resistencia al arco y al factor de pérdidas dieléctricas. En la actualidad, a pesar de haber aparecido otros muchos materiales plásticos de excelentes propiedades, las baquelitas siguen teniendo una extensa gama de aplicaciones en Electrotecnia.

Las baquelitas se obtienen por reacción de policondensación de los *fenoles con el formaldehido* o *formol*, con ayuda de un catalizador, generalmente alcalino (por ejemplo, el amoníaco).

Los *fenoles* pueden considerarse como sustancias derivadas de los hidrocarburos aromáticos por sustitución de un átomo del núcleo, por el grupo hidroxilo —OH. El más empleado en la técnica de los plásticos es el *fenol*, propiamente dicho, o *ácido fénico*, cuya fórmula desarrollada es

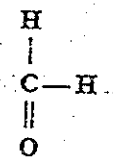


y que, en lo sucesivo, representaremos por su forma simplificada



El fenol o ácido fénico es un compuesto blanco cristalino que colorea de rosa en el aire.

El otro cuerpo básico para la obtención de las baquelitas es el *formaldehido* o *formol*, cuya fórmula desarrollada es



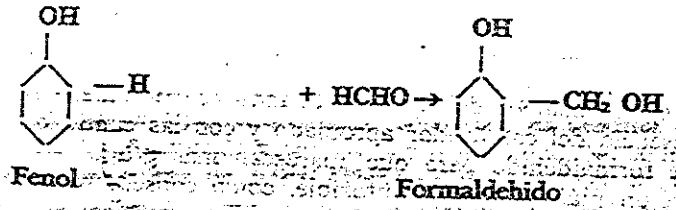
y que, en lo sucesivo, representaremos más abreviadamente por

HCHO

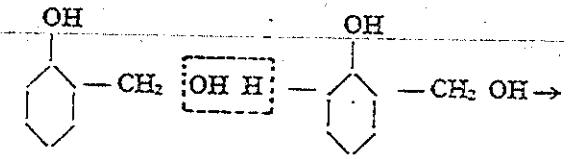
El formaldehido es un gas a la temperatura ordinaria, que se obtiene por hidrogenación del óxido de carbono (CO) o por oxidación del metano (CH_4); éste último es el principal componente del gas natural que acompaña siempre al petróleo.

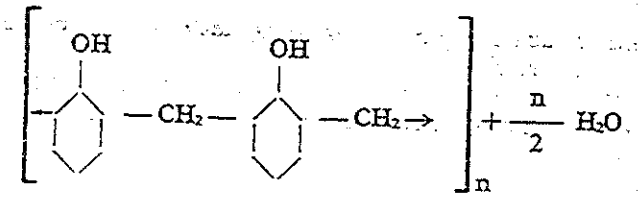
El formaldehido actúa como estabilizador en las resinas fenólicas de las que forman parte, de tal forma que la proporción de formaldehido resulta determinante para que el material obtenido resulte termoplástico o termoestable, como veremos más adelante.

Las reacciones químicas que se producen durante la formación de las baquelitas son complicadas, pero se cree que el primer paso es una adición simple del fenol al formaldehido, en presencia del correspondiente catalizador, de la siguiente forma

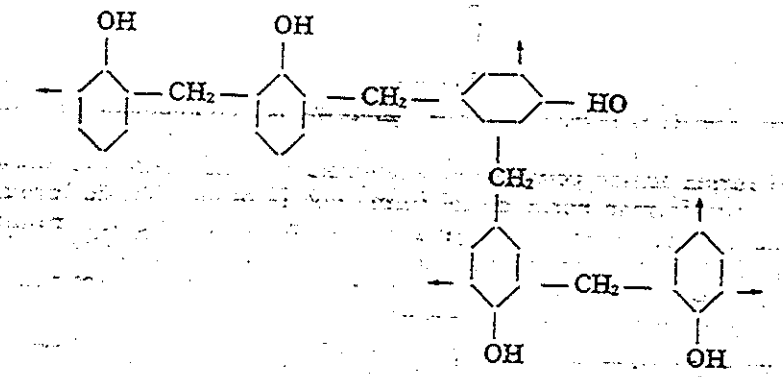


Este producto inicial se condensa, para formar la molécula gigante, por eliminación de agua, de la siguiente forma:





Ahora bien, tanto los grupos hidroxilo (— OH) como los grupos (— CH_2 —) pueden estar unidos a diferentes átomos de carbono del anillo bencénico (⬡), obteniéndose una red compleja tridimensional; por ejemplo, a continuación se expresa una pequeña parte de esta red, en la que podrán apreciarse las diferentes uniones entre moléculas adyacentes



Como puede apreciarse, quedan disponibles diferentes puntos reactivos (que se han indicado mediante flechas), por lo que la red formada sigue teniendo posibilidades para crecer, formando ángulos en las tres dimensiones del espacio. Cuando este polímero se calienta en presencia del catalizador apropiado y con las cantidades adecuadas de formaldehido para que aparezcan más grupos — CH_2 —, se obtiene un plástico duro e infusible, como consecuencia de la formación de enlaces transversales entre cadenas adyacentes. Cada molécula que se adiciona a esta estructura ofrece nuevos puntos de enlace para otras moléculas, de forma que la estructura crece indefinidamente y cada vez más deprisa, a medida que se hace mayor pues, cada vez hay más puntos de enlace. El peso molecular de una estructura de esta clase, crece en proporciones geométricas.

Puede comprenderse ahora por qué hemos hablado de "baquelitas" en plural ya que, efectivamente, existen varios compuestos con este nombre cuya constitución depende, esencialmente, de estos factores:

a) porcentaje de fenol, formaldehido y catalizador
b) temperatura de la reacción
c) estado en que se interrumpe la reacción

Actualmente, las proporciones de los elementos que constituyen las materias básicas para la producción de las baquelitas, son las siguientes:

Fenol ⟶ 24 partes
Formaldehido ⟶ 100 partes
Amoníaco al 88 % ⟶ 9,4 partes

Las reacciones dan lugar a tres fases de condensación, que corresponden a tres aspectos distintos de las baquelitas.

1.ª Fase de condensación: se obtiene la *baquelita A* o *resol*, a temperatura inferior a 50° C. Esta baquelita es líquida, viscosa o, incluso, sólida, soluble en los alcoholes, en la acetona, en fenol y glicerina, por lo que puede utilizarse, en disolución, como barniz *(barnices de baquelita)*.

2.ª Fase de condensación: es un producto intermedio, denominado *baquelita B* o *resitol*, sólida pero desmenuzable e insoluble en casi todos los disolventes. Cuando se calienta, esta baquelita se reblandece y se hace plástica, es decir que se trata, en realidad, de un material termoplástico. De esta fo. a puede moldearse fácilmente y se transforma, por calentamiento, en baquelita C.

3.ª Fase de condensación: Calentando la baquelita B a una temperatura de 180-200° C, se obtiene la *baquelita C* o *resita*, estado final de la condensación. Es un cuerpo duro, estable e insoluble a todos los disolventes conocidos. No es higroscópica y resulta inalterable a la mayor parte de agentes químicos: solamente es atacada por el ácido sulfúrico concentrado y por los álcalis hirviendo. No se inflama y resiste temperaturas de 300° C. Tiene gran resistencia al choque. Su principal inconveniente es la falta de elasticidad y de flexibilidad.

Aplicaciones de las baquelitas. La *baquelita A* finamente pulve-

rizada y mezclada, a temperatura conveniente, con ciertos cuerpos inertes o cargas, constituye lo que se denomina *polvos de moldear*. La mezcla del polvo de baquelita con la carga, debe hacerse perfectamente íntima y homogénea. El producto resultante se seca cuidadosamente en la estufa y se pulveriza después.

La carga normal es la *harina de madera* que se mezcla previamente con lubricantes y colorantes, y se pasa después por unos cilindros mezclados, calentados interiormente, lo que avanza el endurecimiento de la resina y densifica el producto. Se obtienen de esta forma unas placas quebradizas que, en molinos apropiados, se reducen a polvos, aptos para el moldeo. Las piezas moldeadas son estables dimensionalmente, es decir que conservan sus dimensiones geométricas, tienen buena resistencia al calor y a la humedad, aun sumergidas en agua, son resistentes a los disolventes, a los ácidos y álcalis débiles y presentan excelentes propiedades mecánicas y eléctricas.

Pueden utilizarse también otras cargas, con lo que se obtienen baquelitas con algunas variaciones en determinadas propiedades. Si se emplea una carga mineral, tal como *polvo de mica*, se aumenta el peso específico del material y mejoran la rigidez dieléctrica, la estabilidad dimensional, la resistencia al calor y la resistencia a la humedad. A veces se emplean *fibras vegetales* (algodón y otras), con lo cual se mejora la resistencia mecánica, especialmente la resistencia al choque. También pueden utilizarse como carga, *fibras de amianto* y *fibras de vidrio* y, con ello, se aumenta el peso específico y se mejoran la resistencia al calor y a la combustión, la estabilidad dimensional, la resistencia a la humedad y la resistencia a la tracción y al choque. Si la carga es fibra de vidrio, se mejora especialmente la rigidez dieléctrica, mientras que con fibras de amianto se mejora la resistencia de aislamiento y se consigue reducir las variaciones de las características eléctricas por efecto de la humedad.

La baquelita A también se utiliza en la fabricación de los *barnices de baquelita*, que se obtienen disolviendo la baquelita en alcohol etílico, alcohol amílico, benzol, etc. Con estos barnices pueden obtenerse laqueados muy duros y resistentes. Se emplean para la impregnación de toda clase de materiales: madera, cartón, papel, tela, aislamiento de hilos para bobinados, etc.

La *baquelita B* es un gran dieléctrico. Su constante dieléctrica, comprendida entre 5,6 y 8,8, se aproxima a las de la mica y el vidrio. La rigidez dieléctrica es muy elevada.

La resistencia de este material a todos los agentes químicos corrientes: aceites, alcohol, acetonas, sulfuro de carbono, bencina, benzol, etc., así como su incombustibilidad y su infusibilidad, son otras tantas cualidades para constituir excelentes barnices aislantes de impregnación. Estos barnices se utilizan, especialmente, en las máquinas

eléctricas que giran a gran velocidad, ya que permiten inmovilizar los devanados, constituyendo un bloque compacto, muy resistente a los esfuerzos de la fuerza centrífuga. Por el contrario, no es aconsejable su empleo, como barniz de impregnación, en las máquinas normales, ya que no es posible realizar una reparación sin dejar fuera de uso todo el devanado.

La *baquelita C*, llamada también *baquelita noble*, se emplea poco en Electrotecnia, a pesar de sus extraordinarias cualidades dieléctricas, debido a que su precio resulta demasiado elevado. Este material se utiliza en bisutería, como sustituto del ámbar, marfil, etc., y, también, en aplicaciones electrotécnicas muy especiales.

En la tabla de la página siguiente se expresan las características técnicas de algunos tipos de baquelitas puras o con diferentes cargas.

Otras resinas fenólicas. Hemos visto anteriormente que la resina fenólica denominada *baquelita* se obtiene a partir del fenol (o ácido fénico) y del formaldehido (o formol), en presencia de un catalizador alcalino.

Existen además otras resinas fenólicas, las cuales se obtienen a partir de otros fenoles y de otros aldehidos, en presencia de distintos catalizadores, ácidos o alcalinos.

Según el fenol empleado, resultan propiedades distintas para el producto obtenido. Pero, en general, estos productos se obtienen por policondensación, se hacen muy duros después de la polimerización completa y son impermeables al agua. Todos ellos son buenos aislantes eléctricos y se presentan comercialmente como productos laminados, en piezas moldeadas y como productos de impregnación.

Las resinas fenólicas conocidas actualmente se pueden dividir en tres grandes grupos:

1.° *Resinas solubles y fusibles.* Generalmente, se obtienen por una acción reducida de formaldehido en presencia de un catalizador ácido. Pueden hacerse solubles a los álcalis débiles, sustituyendo el fenol por un ácido fenólico.

2.° *Resinas insolubles e infusibles.* Se emplea mayor proporción de formaldehido que en las anteriores y solamente en presencia de catalizadores alcalinos.

3.° *Resinas solubles en los aceites secantes.* Las resinas anteriores son insolubles en los hidrocarburos del petróleo, en los derivados de la hulla y en los aceites secantes, por lo que no pueden utilizarse para la preparación de barnices aislantes. Pero se pueden hacer solubles, calentándolos con una resina natural (colofonia, copal, etcétera), con resinas de cumarona o con mezclas de aceites secantes y de ácidos grasos de estos mismos aceites. De esta forma se obtienen

resinas que se disuelven en los aceites secantes por un simple calentamiento hacia 150 a 200° C.

Todas las resinas citadas tienen gran resistencia a la humedad, a los ácidos y a los álcalis. Pueden modificarse sus características por adición de diversas cargas (harina de madera, talco, amianto, mica, etcétera). La *baquelita*, estudiada anteriormente es la más conocida y de mayor aplicación, de estas resinas.

Algunas denominaciones comerciales de las resinas fenólicas: *Abberita, Alberita, Albertol, Amberol, Ambroína, Bakelite, Beckacita, Catalin, Celeron, Decorita, Durax, Durez, Durite, Durofeno, Eshalita, Faturán, Formica, Haveg, Heliosita, Idonita, Jarax, Jaroplast, Kerita, Lacaina, Leucorita, Makalot, Micarta, Neorresita, Novolaca, Penelyte, Pantolita, Phenolite, Pliopal, Redmanol, Repelita, Resinox, Resistán, Resopal, Sipilita, Spauldite, Synthane, Tenacita, Textolite, Tiolita, Trolita S, Trolitán, Trolona, Vigopás.*

Resinas ureicas

Estos materiales se denominan también *aminoplastos* y *resinas de ureaformaldehido*, ya que se obtienen por reacción de policondensación de la *urea*, cuya fórmula estructural es

$$NH_2-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-NH_2$$

con el *formaldehido* o *formol*, de fórmula estructural

$$HCHO$$

cuyas características se han expuesto en el parágrafo anterior.

La reacción se efectúa en presencia de una amina (cuerpo orgánico nitrogenado) que actúa como catalizador, para formar la *metilolurea*, de la siguiente forma

$$\underset{\text{Urea}}{NH_2-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-NH_2} + \underset{\text{Formaldehido}}{HCHO} \rightarrow \underset{\text{Metilolurea}}{HOCH_2-NH-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-NH_2}$$

El producto inicial se condensa para formar la molécula gigante, por eliminación de agua, de la forma que se expresa a continuación

$$H_2N-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-NH-H_2C\ \boxed{OH+H}\ \overset{H}{\overset{|}{N}}-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-NH-H_2COH \rightarrow$$

$$\left[\leftarrow N-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-N-H_2C-N-\underset{\underset{O}{\|}}{C}-H_2C\rightarrow\right] + H_2O$$

Por enlace de los diferentes puntos de reacción indicados, se obtiene una red compleja tridimensional, que constituye la resina ureica, propiamente dicha; a continuación, se expresa una pequeña parte de esta red, para que se puedan apreciar los distintos enlaces entre las moléculas adyacentes

$$\begin{array}{c} \leftarrow CH_2-N-CH_2\rightarrow \\ | \\ C=O \\ | \\ \leftarrow N-CH_2-N-CH_2 \\ | \\ O=C-CH_2-N-CH_2\rightarrow \\ | \\ C=O \\ | \\ CH_2 \\ \downarrow \end{array} \quad \begin{array}{c} \uparrow \\ -N- \end{array} \quad \begin{array}{c} \leftarrow CH_2-N-CH_2\rightarrow \\ | \\ C=O \\ | \\ CH_2-N-CH_2-N\rightarrow \\ \downarrow \end{array}$$

Como puede apreciarse, quedan disponibles diferentes grupos reactivos, tanto de los $-CH_2$ como de los $-N$ (que se han indicado mediante flechas) por lo que la red así constituida sigue teniendo posibilidades para crecer, formando ángulos en las tres dimensiones del espacio. Cuando este polímero se calienta en presencia del catalizador adecuado y con las debidas cantidades de formaldehido, se obtiene un plástico duro e infusible, como consecuencia de la formación de enlaces transversales entre las cadenas adyacentes. Cada molécula que se añade a esta estructura ofrece nuevos puntos reactivos de enlace para otras moléculas, de forma que, tal como sucedió también con las resinas fenólicas, la estructura crece indefinidamente y con rapidez creciente. Por lo tanto, el peso molecular crece también en proporciones geométricas.

En resumen, la creacción de policondensación puede descomponerse en tres fases, que corresponden a tres productos diferentes:

1.ª Fase: Producto inicial, soluble en el agua.

2.ª Fase: El producto anterior, calentado y con adición de nuevas cantidades de formaldehido se convierte en un producto termoplástico, insoluble en el agua, incoloro, transparente, que se gelatiniza por enfriamiento.

3.ª Fase: El producto anterior, mediante un nuevo calentamiento a 80° C y con adición de nuevas cantidades de formaldehido, se convierte en un producto termoestable, insoluble e infusible.

Hemos visto que la producción de las resinas ureicas es muy parecida a la de las resinas fenólicas, expuesta en el parágrafo anterior. Sus propiedades también son parecidas, aunque las resinas ureicas tienen la desventaja, respecto a las anteriores, de poseer menor resistencia a la humedad y menos estabilidad dimensional. No obstante, se caracterizan por una muy elevada resistencia a las corrientes de fuga superficiales, que no poseen las resinas fenólicas; esta propiedad determina, en muchos casos, la utilización de las resinas ureicas a pesar de las desventajas anteriormente citadas.

a las resinas fenólicas

Como en el caso de las resinas fenólicas, también pueden adicionarse diferentes cargas a las resinas ureicas, que modifican sus propiedades.

La diferencia fundamental entre ambos tipos de resinas, consiste en que las resinas fenólicas solamente pueden moldearse en colores oscuros, debido al color que ya presentan de por sí y porque envejecen al estar expuestas a la luz, mientras que a las resinas ureicas pueden añadirse toda clase de colorantes y pigmentos, obteniéndose piezas moldeadas de colores claros y agradable apariencia, puesto que ~~ya se ha dicho que~~ la resina es incolora y transparente.

Uno de los principales empleos de estas resinas está en la construcción de paneles aislantes de agradable aspecto y excelentes propiedades dieléctricas.

Cuando se incorporan cargas tales como grafito o metales finamente pulverizados, pueden obtenerse piezas moldeadas que presentan buena conductibilidad y que pueden utilizarse como escobillas para las máquinas eléctricas.

A continuación, se exponen en la tabla 40 las características más interesantes de las resinas ureicas.

Algunas denominaciones comerciales: *Aerolite, Aminolac, Arodur, Beetle, Cellodal, Gabrite, Kaurite, Novoply, Plaskon, Plastopal, Pollopas, Pristal, Resamin, Uformite, Uropal.*

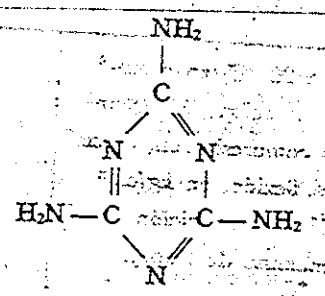
TABLA 40. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS UREICAS

CARACTERISTICAS FISICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,45 ... 1,50
	Resistencia a la tracción, en kg/cm²	560 ... 915
	Resistencia a la compresión en, kg/cm²	1 750 ... 2 100
	Resistencia a la flexión, en kg/cm²	700 ... 1 125
	Temperatura de descomposición, en °C	85
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	75
	Absorción de agua en 24 horas, en %	0,5 ... 0,7
	Resistencia a la llama	Buena
CARACTERISTICAS ELECTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{12} ... 10^{13}
	Rigidez dieléctrica, en kV/mm	12 ... 15
	Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	7 ... 7,4
	Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	6,6 ... 7,7
	Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	29×10^{-3} ... 32×10^{-3}
	Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	27×10^{-3} ... 35×10^{-3}
CARACT QUIMICAS	Resistencia a la humedad	Buena
	Resistencia a las radiaciones ultravioletas del Sol	Excelente
	Resistencia a los ácidos orgánicos y minerales diluidos	Muy buena
	Resistenci a los álcalis diluidos	Muy buena

Resinas de melamina

Lo mismo que los anteriores, estos materiales son también *aminoplastos*, es decir, plásticos derivados de los compuestos orgánicos

nitrogenados. Se obtienen por reacción de policondensación de la *melamina*, cuya fórmula desarrollada es

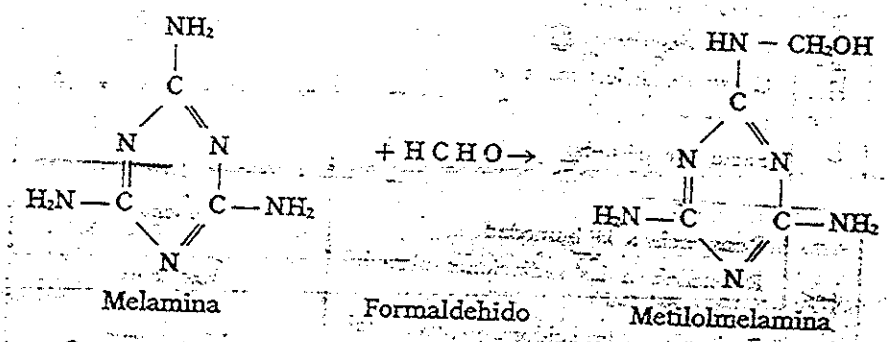


con el *formaldehido* o *formol*, de fórmula estructural

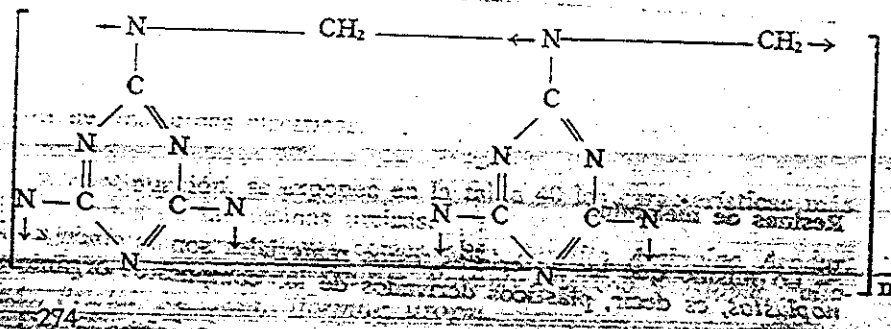
$$HCHO$$

cuyas características se han expuesto en un parágrafo anterior.

Esta reacción se efectúa en presencia de una amina (cuerpo orgánico nitrogenado), que actúa como catalizador, para formar la *metilolmelamina*, de la siguiente forma



Como en los casos anteriores (resinas fenólicas y ureicas), el producto inicial se condensa, con eliminación de agua, constituyéndose el polímero, de la forma



Las flechas indican los puntos de reacción, por donde se establecen los enlaces con otros monómeros, constituyendo una red tridimensional muy compleja, de forma semejante a la estudiada en el caso de las resinas fenólicas y de las resinas ureicas.

Las resinas de melamina tienen buena resistencia a las corrientes de fuga superficiales, semejante a la de las resinas ureicas. Pero tienen la ventaja sobre éstas de que su resistencia a la humedad es superior. También son superiores, la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia al calor y mejores sus propiedades dieléctricas. Poseen buena resistencia a los ácidos y álcalis débiles, que disminuye ante las concentraciones fuertes de estas sustancias. Tienen buena resistencia al arco eléctrico. Como la resina es incolora y transparente, admite toda clase de colorantes, obteniéndose productos de cualquier color, incluso muy claros.

Arden con dificultad y la llama se extingue por sí misma. La llama es débilmente amarillenta. Se hinchan, funden y se vuelven blancos los bordes de la sección que arde. Al arder, despiden olor a amoníaco.

Los productos plásticos a base de melamina son muy apreciados, pero su elevado precio en comparación con las resinas fenólicas y con las resinas ureicas, limita sus aplicaciones.

Lo mismo que las resinas fenólicas y ureicas, admiten cargas tales como harina de madera, fibras vegetales, fibras de amianto, etc. que modifican algunas de sus características, según la aplicación prevista de estas resinas.

En la página siguiente, se resumen en una tabla las principales características de las resinas de melamina, adicionadas con tres cargas diferentes.

Algunas denominaciones comerciales: *Cibanoid, Lamelite, Lyofix, Maprenal, Melantina, Melbrite, Melmac, Melolam, Melopás, Plastimetl, Resimine, Ultrapás.*

Resinas de anilina

Como las resinas ureicas y las de melamina, las *resinas de anilina* son también *aminoplastos*. En este caso, en la reacción de policondensación, se parte de la *fenilamina* o *anilina*, cuya fórmula estructural es

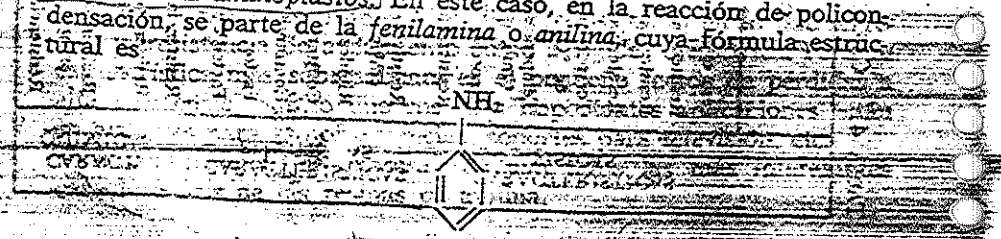


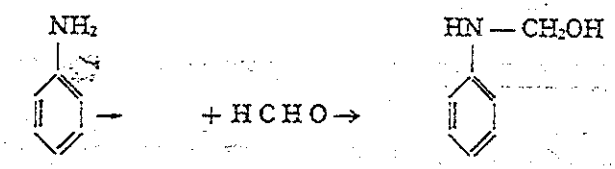
TABLA 41. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS DE MELAMINA

	Características	Resina de melamina cargada con Harina de madera	Fibras vegetales	Amianto
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,45 ... 1,55	1,4 ... 1,45	1,7 ... 1,85
	Resistencia a la tracción, en kg/cm²	560 ... 915	250 ... 500	400 ... 500
	Resistencia a la compresión, en kg/cm²	1 900 ... 2 600	1 600 ... 2 200	2 100
	Resistencia a la flexión, en kg/cm²	700 ... 1 125	740 ... 1 100	500 ... 1 000
	Temperatura de descomposición, en °C	110	120	170 ... 210
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	100	100	150 ... 200
	Absorción de agua en 24 horas, en %	0,3 ... 0,6	0,1 ... 0,2	0,1 ... 0,14
	Resistencia a la llama	Excepcional	Excepcional	Excepcional
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios, cm²/cm	10^{13} ... 10^{13}	10^{12}	$2,4 \times 10^{11}$
	Rigidez dieléctrica, en kV/mm	12 ... 16	10 ... 14	14 ... 18
	Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	9 ... 9,5	6,5 ... 7,5	6,5 ... 10
	Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	3,5 ... 7,5	5,5 ... 7,2	6,7
	Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	43×10^{-3} ... 45×10^{-3}	80×10^{-3}	70×10^{-3} ... 170×10^{-3}
	Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	50×10^{-3}	10×10^{-3} ... 20×10^{-3}	40×10^{-3}
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	Resistencia a la humedad	Muy buena	Excelente	Excelente
	Resistencia a las radiaciones ultravioletas del Sol	Buena	Buena	Buena
	Resistencia a los ácidos minerales y orgánicos diluidos	Excepcional	Excepcional	Excepcional
	Resistencia a los álcalis diluidos	Excepcional	Excepcional	Excepcional

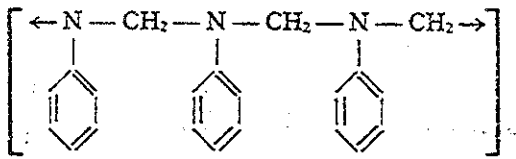
y, como en las ocasiones anteriores, del *formaldehido* o *formol*

$$HCHO$$

En presencia de una amina como catalizador, se obtiene el *metilolanilina*, de la siguiente forma



Como en los demás aminoplastos, el producto inicial se condensa, con eliminación de agua, constituyéndose el polímero, cuya fórmula general es



Por los puntos de reacción, indicados por las flechas se establecen los enlaces con nuevos monómeros, constituyendo la red tridimensional compleja que caracteriza a los materiales termoestables, de forma muy parecida a la ya estudiada en los anteriores parágrafos.

Las resinas de anilina tienen color rojizo o castaño, un alto punto de reblandecimiento y escasa fluidez. Son insolubles a los disolventes ordinarios, por lo que no pueden utilizarse como barnices aislantes.

Estas resinas son modelables en bloques compactos, exentos de burbujas, sin necesidad de materiales de relleno. Son trabajables por mecanizado, resistentes a los álcalis y de gran tenacidad a la percusión.

Tienen excelentes propiedades dieléctricas, tanto en lo que se refiere a resistencia de aislamiento como a rigidez dieléctrica. Pero su característica más sobresaliente es el pequeño factor de pérdidas a alta frecuencia, por lo que sus más importantes aplicaciones están en aislantes para radiofrecuencias, soportes para televisión, etc.

A continuación, se expresan en una tabla las más interesantes características de las resinas de anilina

TABLA 42.—CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS DE ANILINA

CARACTERISTICAS QUIMICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,20 ... 1,25
	Resistencia a la tracción, en kg/cm²	600 ... 700
	Resistencia a la compresión, en kg/cm²	1 400 ... 1 600
	Resistencia a la flexión, en kg/cm²	850 ... 1 400
	Temperatura de descomposición, en °C	100 ... 110
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	80 ... 90
	Absorción de agua en 24 horas, en %	0,01 ... 0,08
	Resistencia a la llama	Muy buena
CARACTERISTICAS ELECTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{12} ... 10^{13}
	Rigidez dieléctrica, en kV/mm	23,5 ... 25,5
	Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	3,7 ... 3,8
	Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	3,5 ... 3,6
	Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	2×10^{-3}
	Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	4×10^{-3}
CARACT. QUIMICAS	Resistencia a la humedad	Muy buena
	Resistencia a las radiaciones ultravioletas del Sol	Buena
	Resistencia a los ácidos minerales y orgánicos diluidos	Muy buena
	Resistencia a los álcalis diluidos	Excepcional

Algunas denominaciones comerciales: *Cibanite, Dielectene, Iganil, Nullipert.*

Resinas alquídicas y de poliester

Estas resinas se obtienen por poliesterificación de poliácidos con polialcoholes. Recordemos que, de una manera general, se denomina

esterificación, a la reacción de un ácido con un alcohol, obteniéndose un *éster* y agua; por ejemplo:

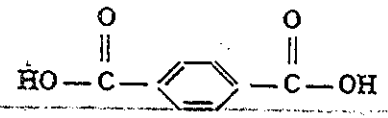
$$CH_3-\underset{\underset{OH}{|}}{C}=O + CH_3-CH_2OH \rightarrow CH_3-\underset{\underset{OCH_2-CH_3}{|}}{C}=O + H_2O$$

Acido acético — Alcohol etílico — Acetato de etilo (éster) — Agua

Para la obtención de las resinas de poliester se parte de diferentes poliácidos y polialcoholes; los productos obtenidos pueden ser termoplásticos o termoestables según las materias básicas de procedencia, la cantidad de estas materias, etc.

Dada la complejidad existentes en lo que se refiere a las resinas de poliester, solamente citaremos las más importantes para el electricista, que son las siguientes:

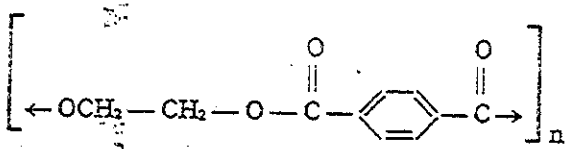
a) Por policondensación del *ácido tereftálico*, cuya fórmula estructural es



con un dialcohol como el *etilenglicol*, de fórmula

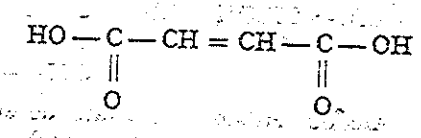
$$CH_2OH-CH_2OH$$

se obtienen las *resinas alquídicas*, denominadas también *gliptales*, de características termoplásticas, ya que no se endurecen con el calor, y cuya fórmula general es

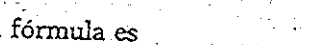


Las resinas alquídicas, combinadas con aceites secantes o con ácidos (ácido ftálico, succínico, málico, etc.), proporcionan toda una serie de materiales utilizados como barnices aislantes, denominados *secantes rápidos*, que son de gran duración y de gran poder adhesivo. Estos barnices tienen una duración extraordinaria y son muy flexibles.

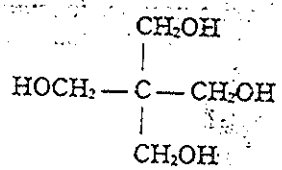
b) Por policondensación del *ácido tereftálico*, citado anteriormente o del *ácido maleico*, de fórmula estructural



con un polialcohol, como la *glicerina*, de fórmula

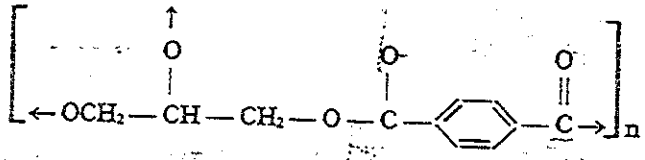


o la *pentaeritrita*, cuya fórmula es



se obtienen las *resinas de poliéster*, propiamente dichas, de carácter termoestable, ya que se endurecen con el calor; por esta razón, muchas veces se consideran las resinas alquídicas (termoplásticas) y las resinas de poliester (termoestables) como dos grupos distintos, aunque nosotros hemos preferido agruparlos en un solo grupo debido a que todas ellas son poliésteres, tal como se ha dicho anteriormente.

Las fórmulas generales de estas resinas dependen, naturalmente, de los productos básicos de los que se han originado. La más utilizada es la constituida a partir del ácido tereftálico y de la glicerina, y cuya fórmula general es



y el cuerpo resultante es el *tereftalato de glicerilo*. Como en los demás materiales termoestables, el polímero resultante tiene abundantes enlaces transversales tridimensionales por unión de los puntos de reacción, señalados con flechas en la fórmula anterior.

En general, las resinas de poliester tienen elevada rigidez dieléctrica y buena resistencia a las corrientes de fuga superficiales. Presentan también buena resistencia a la humedad, a los disolventes y al arco eléctrico, así como excelente estabilidad dimensional.

Pueden moldearse sin carga o, lo que es más corriente, con adición de diferentes cargas a base de polvos minerales, fibras de vidrio y fibras de amianto. Si están moldeadas con carga, especialmente las que contienen fibras de vidrio, presentan muy buena estabilidad térmica, gran resistencia a la tracción y a la combustión.

Estas resinas arden con dificultad, desprendiendo humos muy negros.

A continuación, se incluyen en dos tablas, las características técnicas de las resinas alquídicas y de las resinas de poliéster, respectivamente.

TABLA 43. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS ALQUÍDICAS

CARACTERISTICAS FISICAS	Peso específico, en gr/cm³	1,3 ... 1,5
	Resistencia a la tracción, en kg/cm²	350 ... 450
	Resistencia a la compresión, en kg/cm²	500 ... 1 500
	Resistencia a la flexión, en kg/cm²	500 ... 650
	Temperatura de deformación, en °C	90 ... 110
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	60 ... 80
	Absorción de agua en 24 horas, en %	0,3 ... 0,4
	Resistencia a la llama	Buena
CARACTERISTICAS ELECTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	5×10^{15} ... 5×10^{16}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	15 ... 17
	Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	3,75 ... 4
	Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	3,5
	Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,015
	Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	0,056
CARACT. QUIMICAS	Resistencia a la humedad	Buena
	Resistencia a los ácidos minerales y orgánicos diluidos	Excelente
	Resistencia a los álcalis diluidos	Muy buena

TABLA 44. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS DE POLIESTER (CARGADAS CON FIBRA DE VIDRIO)

CARACTERISTICAS FISICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm²	1,5 ... 2
	Resistencia a la tracción, en kg/cm²	1 000 ... 2 500
	Resistencia a la compresión, en kg/cm²	2 000 ... 3 000
	Resistencia a la flexión, en kg/cm²	2 000 ... 3 000
	Temperatura de descomposición en °C	250 ... 300
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	130
	Absorción de agua en 24 horas, en %	0,02 ... 0,5
	Resistencia a la llama	Excelente
CARACT. ELECTRICAS	Resistibilidad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{13}
	Rigidez dieléctrica, en kV/mm	10
	Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	4 ... 6
	Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,005 ... 0,05
CARACT. QUIMICAS	Resistencia a la humedad	Buena
	Resistencia a los ácidos minerales y orgánicos diluidos	Excelente
	Resistencia a los álcalis diluidos	Muy buena
	Resistencia a los disolventes orgánicos	Excepcional

Algunas denominaciones comerciales de las resinas alquídicas: *Alkydol, Amberlack, Beckosol, Durecol, Dulux, Falkyd, Rezyl, Teglac.* Algunas denominaciones comerciales de las resinas de poliéster: *Fiberglas, Laminite, Plaskon, Vibrin UX.*

Resinas epoxídicas

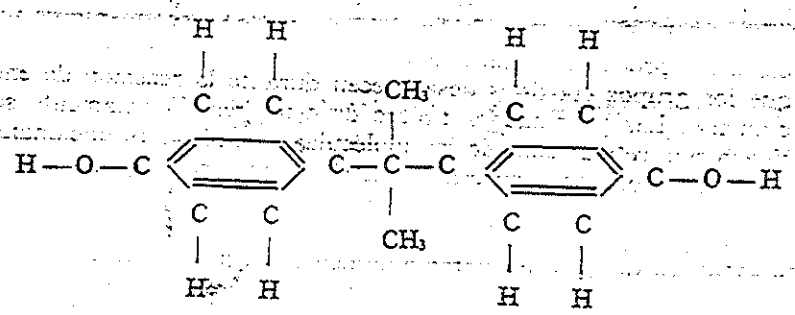
Las *resinas epoxídicas* o *resinas epoxi*, se conocen también con el nombre de *resinas etoxilínicas*. Se presentan como líquidos viscosos o en forma sólida.

Hace unos 30 años, una empresa suiza buscaba un material apto para efectuar prótesis dentales: este material debía ser moldeado y endurecido a la temperatura ambiente o bajo el efecto de un ligero

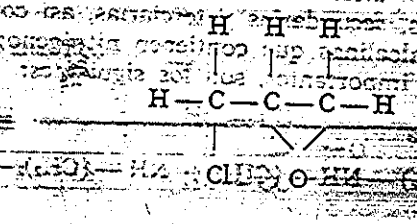
calentamiento. Las reacciones químicas desarrolladas durante el endurecimiento no debían producir ningún producto gaseoso. Además, el endurecimiento debía hacerse, a ser posible, sin contracción del material, de forma que las dimensiones deseadas pudieran obtenerse con precisión. Finalmente, la materia terminada debía resistir a los esfuerzos mecánicos de deformación y a la acción de los agentes químicos, para poder soportar las solicitaciones a las que están sometidas las dentaduras naturales. Se realizaron investigaciones sistemáticas en el dominio de las resinas sintéticas termoendurecibles y se obtuvieron las denominadas *resinas epoxídicas* cuyo campo de aplicación es, actualmente, mucho más amplio que el previsto por los investigadores que iniciaron su estudio.

En 1946 apareció en el mercado la primera resina epoxídica para colada que se denominó *Araldite A* y fue desarrollada por la firma suiza CIBA. Este material, y otros más perfeccionados descubiertos poco después, resultaron de gran interés electrotécnico, por lo que otras firmas europeas y americanas orientaron sus investigaciones hacia este campo.

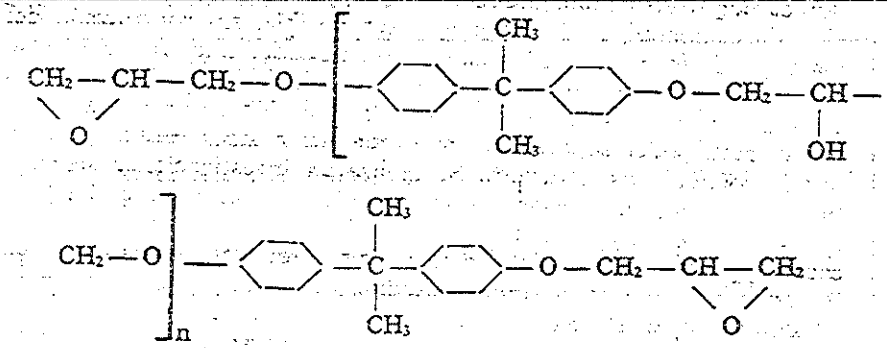
Para captar bien las características de las resinas epoxídicas, importa conocer la estructura química de las materias básicas que intervienen en su fabricación. Estas materias son los cuerpos denominados *difenilolpropano*, cuya fórmula desarrollada es



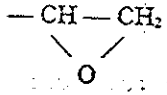
y la *epiclorhidrina*, cuya fórmula desarrollada es la siguiente



Por reacción de estas dos sustancias, se obtiene el siguiente polímero:



Según las cantidades relativas de los dos constituyentes y las condiciones en que se efectúan las reacciones, se obtienen, respectivamente, resinas líquidas, viscosas o sólidas. Cada molécula comprende varios *grupos epóxidos*

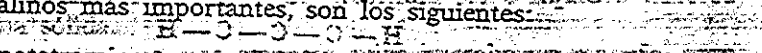


muy reactivos, que constituyen la característica de estas resinas. En realidad, la designación de "resinas epoxídicas" solamente es aplicable a los productos intermedios termoplásticos no endurecidos, porque los grupos epóxidos desaparecen durante la reacción de endurecimiento. Las propiedades típicas de estas resinas solamente se obtienen por reticulación de las moléculas epoxídicas bifuncionales (es decir, del polímero expresado anteriormente) con agentes endurecedores.

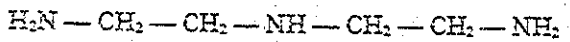
Por poliadición de los elementos de la resina y del agente endurecedor, se produce un notable aumento del peso molecular y formación de macromoléculas. La resina termoplástica inicial se transforma de esta forma en resina termoestable.

Como agentes endurecedores pueden utilizarse diversos compuestos, tanto de carácter alcalino como de carácter ácido. Entre los endurecedores básicos o alcalinos se encuentran las monoaminas y las poliaminas primarias, secundarias y terciarias, así como las combinaciones orgánicas alcalinas que contienen nitrógeno; los endurecedores alcalinos más importantes, son los siguientes:

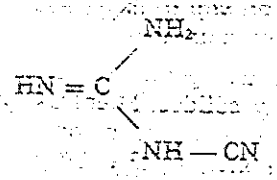
la trietilenotetramina



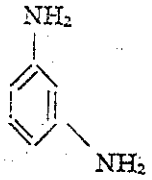
la dietilenotriamina



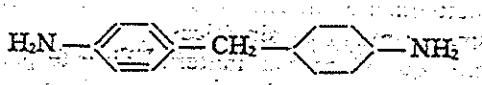
la dicianamida



la metafenilenodiamina

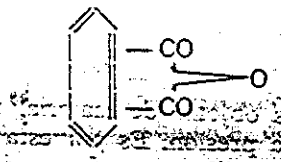


y el diamino - difenil - metano.

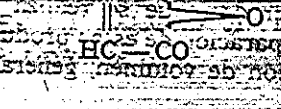


Los principales agentes endurecedores ácidos son anhidridos de compuestos orgánicos, entre los que se pueden citar

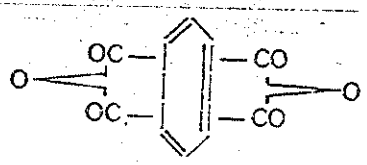
el anhidrido ftálico



el anhidrido maleico



y el anhidrido piromelítico



En ambos grupos de agentes endurecedores (alcalinos y ácidos) hay cuerpos líquidos y sólidos. Mientras que por cada 100 partes de resina en peso, basta generalmente con 1 a 30 partes de endurecedor alcalino, hay que disponer de 25 a 130 partes para el caso de endurecedor ácido.

La magnitud determinante para la dosificación óptima de agente endurecedor es el *equivalente epóxido de la resina*. Para las resinas epoxídicas líquidas más corrientes, este equivalente es del orden de 200, mientras que para la mayor parte de resinas epoxídicas sólidas, está próximo a 400. Esto quiere decir, que cada cantidad de 200 g de resina (en el primer caso), o de 400 g (en el segundo caso), contiene un grupo epóxido, definido anteriormente. Por consiguiente, las resinas líquidas son más reactivas que las sólidas y necesitan más cantidad de agente endurecedor.

Resulta interesante buscar las causas de que las resinas epoxídicas hayan encontrado tan rápidamente las numerosas y diversas aplicaciones que actualmente tienen en Electrotecnia, cuando ya disponía de otras resinas y materias sintéticas.

Recordemos que el primer material de este género fue la baquelita; después, se utilizaron las resinas ureicas y las de melamina. Estas resinas termoestables son, en su estado final, prácticamente insoluble e infusibles; durante la reacción de endurecimiento (policondensación), se liberan los componentes volátiles, como el agua y el amoniaco. Al mismo tiempo, se produce una reducción de volumen ya que los productos macromoleculares finales tienen una estructura más compacta que los elementos constituyentes de los materiales iniciales. Con objeto de que los productos liberados no puedan formar burbujas y para que la contracción de volumen quede compensada en lo posible, los objetos de material termoestable granuloso deben moldearse a alta presión. Es por esta razón que estos materiales solamente pueden utilizarse en forma de piezas moldeadas.

Por otra parte, los materiales termoplásticos (polietileno, policloruro de vinilo, poliestireno, etc.) se obtienen por polimerización de combinaciones no saturadas, que se realiza sin separación de productos volátiles. La preparación de estos productos está también acompañada de una reducción de volumen, generalmente mayor de 10 %.

Gran número de estos materiales tienen, como hemos visto en los parágrafos correspondientes, muy buenas propiedades eléctricas, pero su empleo solamente resulta posible para temperaturas inferiores a 100° C.

Las resinas epoxídicas puras son, propiamente hablando, materiales termoplásticos que, por un mecanismo químico de endurecimiento, se transforman en un cuerpo duro que no es plástico, es decir, en un material termoestable. En comparación con los materiales citados anteriormente, estas resinas están caracterizadas por las siguientes propiedades:

a) se prestan a diversas aplicaciones y pueden utilizarse para revestir, impregnar, pegar y barnizar.
b) su empleo es posible a la temperatura ambiente o a una temperatura algo más elevada.
c) pueden emplearse puras o diluidas o añadirles diversas cargas.
d) gran número de variantes, que comprenden la resina, los agentes endurecedores, las cargas y otras materias, en diferentes proporciones, permiten responder a las más diversas exigencias de aplicación.
e) permiten recubrir pantallas metálicas, partes activas de aparatos eléctricos y piezas de conexión, manteniéndolas sólidamente en su posición.
f) no se desprende ningún producto volátil durante la operación de endurecimiento, por lo que la contracción de volumen es muy pequeña.
g) cuando están endurecidas, se adhieren bien a casi todos los cuerpos.

A continuación, se estudiarán, resumidamente, las principales propiedades de las resinas epoxídicas, para lo que las dividiremos en dos grandes grupos:

1. *Resinas epoxídicas puras*
2. *Resinas epoxídicas cargadas*

Resinas epoxídicas puras. Actualmente, las resinas epoxídicas más importantes y, también, más extendidas, son las que proceden de la reacción, anteriormente estudiada, del *difenilolpropano* con la *epiclorhidrina*.

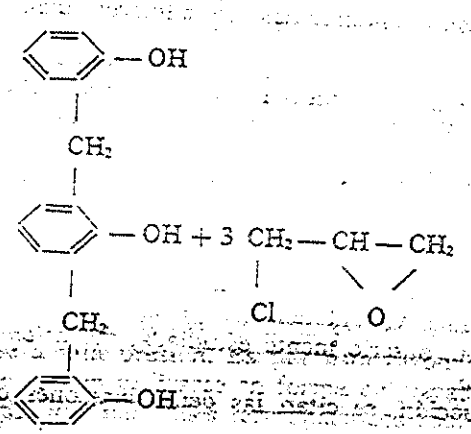
A continuación, se citan las denominaciones comerciales de las más importantes:

Resinas líquidas, no modificadas, con equivalente epóxido cercano a 200: Araldite F, DER 331, Dobeckot 501, Epicote 828, Epotuf 37-140, ERL 2774, GfT 0164, Grilonite G 3.

Resinas sólidas, no modificadas, con equivalente epóxido cercano a 400: Araldite B, DER 661, Dobeckot 500, Epikote 864, Epotuf 37-300, GfT 0180, Grilonite G 1, Lekutherm X-30.

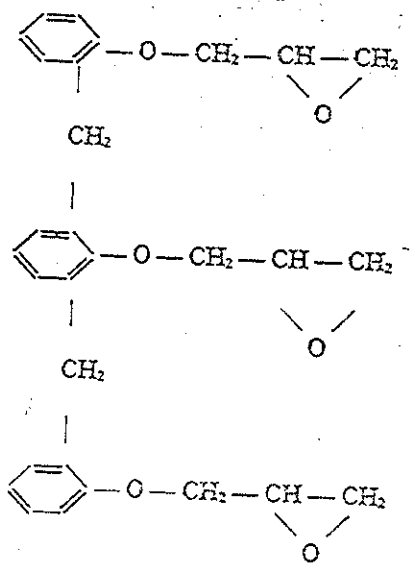
Partiendo de estos tipos, se fabrica gran cantidad de resinas modificadas. Por adición de diluyentes, sobre todo de éteres glicídicos monómeros, se puede disminuir sensiblemente la viscosidad de estas resinas. Pueden obtenerse otras variantes por adición de materiales flexibilizadores reactivos. También es posible mezclar los productos de las dos operaciones anteriores. Por estas razones, actualmente existe tan gran número de resinas epoxídicas endurecibles al calor y al frío, que apenas resulta posible ensayar todas ellas para hacer una selección. Además, el número de agentes endurecedores actualmente disponibles es muy considerable, lo que multiplica el número de variantes posibles. Puede comprenderse fácilmente que sólo los especialistas pueden tener una visión de conjunto clara sobre esta materia.

Los diversos estudios efectuados con objeto de encontrar nuevas resinas epoxídicas han conducido, entre otros resultados, a una estructura interesante: se trata de los éteres glicídicos derivados de las novolacas y denominadas *novolacas epoxídicas*. Estos materiales están caracterizados porque resisten de forma extraordinaria las temperaturas elevadas. Se hace reaccionar la novolaca con la epiclorhidrina, de la forma siguiente:

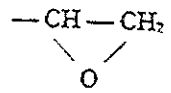


Novolaca + Epiclorhidrina

obteniéndose el éter correspondiente, que es la novolaca epoxídica



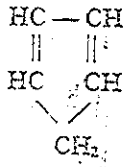
Esta molécula contiene tres grupos epóxidos



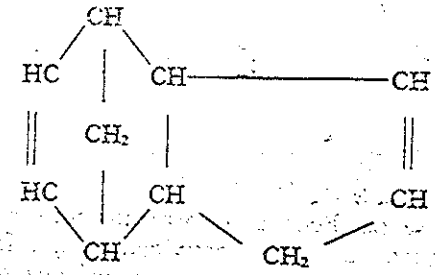
que son, como se ha dicho anteriormente, muy reactivos. Por consiguiente, está dotada de gran reactividad, lo que favorece la reticulación entre los elementos de la resina y del agente endurecedor, durante la poliadición o el endurecimiento. Cuanto más compacta es la estructura, más estables son los enlaces a alta temperatura. A pesar de esta excelente resistencia al calor, estas novolacas epóxidas no pueden reemplazar a las epóxidas bifenoles ya clásicas, en su empleo como aislantes. Su gran reactividad tiene el inconveniente de hacer relativamente corta su duración de empleo. A pesar de esto, el endurecimiento debe hacerse a temperaturas que pueden alcanzar hasta 200° C, si se quiere obtener gran resistencia al calor. Por otro lado, la presencia de numerosos núcleos fenólicos en las novolacas epóxidas, tiene por efecto disminuir la resistencia de las piezas moldeadas a las corrientes de fuga y a los arcos eléctricos. Por el contrario, estas resinas pueden convenir y presentar importantes ventajas para la fabricación de piezas de aparatos que hayan de estar sometidos a fuertes solicitaciones térmicas y mecánicas.

Las resinas epoxídicas que hemos estudiado hasta ahora, se obtienen por síntesis de la epiclorhidrina y de grupos hidroxilos fenólicos. Las resinas termoplásticas obtenidas pueden reticularse con agentes endurecedores ácidos y alcalinos, a la temperatura ambiente o a una temperatura superior. Podemos denominarlas *resinas epoxídicas fenólicas.*

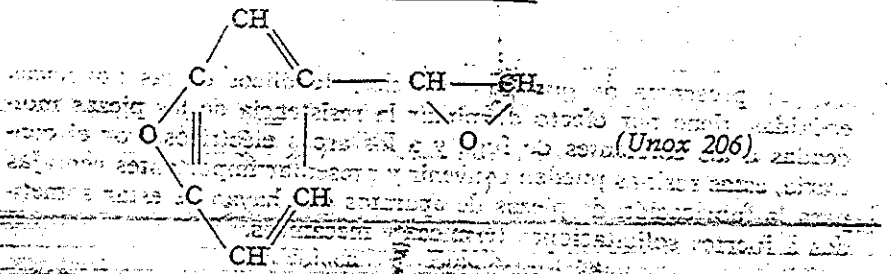
Pero desde el año 1960 han aparecido en el mercado resinas epoxídicas fabricadas con la ayuda de materias y por procedimientos totalmente diferentes y que se denominan *resinas epoxídicas cicloalifáticas.* Se obtienen por epoxidación de combinaciones olefínicas especiales, con ayuda de perácidos alifáticos. Los materiales de partida son, por ejemplo, el *ciclopentadieno.*



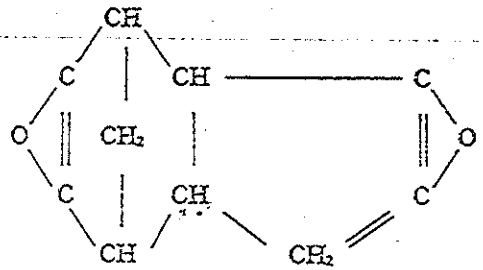
y el *diciclopentadieno*



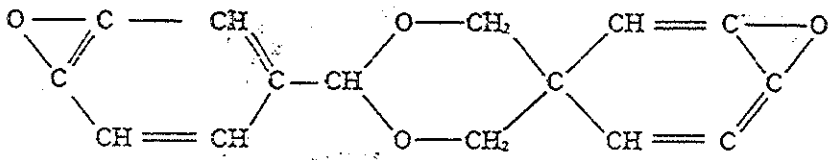
Si se observan muy cuidadosamente las condiciones en que se realiza la reacción, y si se procede con precaución, los dobles enlaces C = C presentes en estas combinaciones y en otras parecidas, se rompen y se oxidan con ayuda de perácidos determinados. A continuación se exponen las fórmulas estructurales y los nombres comerciales de algunas resinas epoxídicas cicloalifáticas actuales



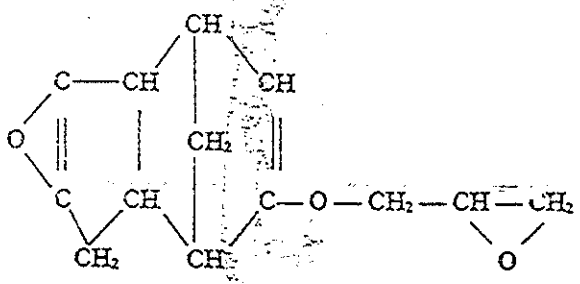
(Unox 206)



(Unox 207)



(Araldite CY 175)



(Araldite X 200/2137)

Como las resinas epoxídicas cicloalifáticas son materiales muy modernos, no se conocen todavía bien sus propiedades. Pero de los estudios realizados hasta la fecha, pueden deducirse las siguientes conclusiones: Se puede decir:

a) se trata de resinas que, por el momento, no se endurecen a la temperatura ambiente, sino a una temperatura superior y en presencia de anhidridos.

b) algunas de ellas se caracterizan por su muy pequeña viscosidad a 20° C.

c) una vez endurecidas soportan bien el calor.

d) su factor de pérdidas tg δ es inferior a 0,01 hasta 200° C y su resistencia a las corrientes de fuga y a los arcos eléctricos es muy elevada.

e) su resistencia a los agentes atmosféricos es superior a la de todas las resinas epoxídicas existentes.

Dadas estas excelentes cualidades, las resinas epoxídicas cicloalifáticas han despertado un vivo interés entre los especialistas. Sin embargo, en los ensayos de aplicaciones prácticas realizados, se ha comprobado que estos nuevos productos presentan todavía algunos defectos que deben eliminarse, sobre todo en lo que se refiere a la fabricación industrial de piezas moldeadas de forma complicada y de grandes dimensiones, en donde han salido algunas dificultades relativas a la temperatura de la colada, a las condiciones de endurecimiento, etc. Parece que pasará cierto tiempo antes de que se hayan remediado estos defectos, pero damos noticia de estos materiales a nuestros lectores porque continúa la investigación de nuevas resinas de esta clase, dadas las excelentes cualidades mecánicas, térmicas y eléctricas de las mismas.

A continuación, se exponen en una tabla las características de tres resinas epoxídicas puras, una líquida, otra sólida y otra cicloalifática, procedentes de un mismo fabricante (CIBA) para que puedan compararse sus respectivas propiedades. El examen de esta tabla permite constatar que cada tipo de resina tiene sus ventajas propias, pero que ninguna de ellas reúne las mejores cualidades desde todos los puntos de vista.

TABLA 45. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS EPOXÍDICAS DURAS

Características	Resina fenólica líquida (Araldite F)	Resina fenólica sólida (Araldite B)	Resina cicloalifática sólida (Araldite CY 175)
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	900 a 1 300	900 a 1 200	300 a 700
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	500 a 800	550 a 850	300 a 400
Temperatura de deformación, en °C	125 a 135	95	Superior a 200
Constante dieléctrica ε, a 20 °C y 50 Hz	3,5 a 3,55	3,7 a 3,9	3,7
Factor de pérdidas (tang δ), a 20 °C y 50 Hz	0,3 a 0,5	0,4 a 0,7	0,5
Resistencia a la corriente de fuga	Muy buena	Muy buena	Excepcional
Resistencia a los arcos eléctricos	Moderada	Moderada	Muy buena

Resinas epoxídicas cargadas. Las resinas epoxídicas tienen una ventaja: sus propiedades pueden modificarse grandemente por la adición de toda clase de cargas. Además, esta posibilidad de admitir cargas relativamente económicas, permite obtener materiales de buenas condiciones de precio. Por estas razones, los fabricantes y los usuarios han desarrollado estudios para comprobar la influencia de las cargas más diversas sobre las propiedades de estos materiales. Las más corrientes de estas cargas son materias minerales de granulometría determinada: harina de cuarzo, arena cuarcífera, polvo de mica, caolín, harina de yeso, harina de pizarra, talco, harina de porcelana, etc.

Los efectos de las cargas sobre las propiedades de las resinas epoxídicas, pueden resumirse como sigue:

a) La duración de empleo y la duración de endurecimiento dependen frecuentemente de la naturaleza y de la cantidad de la carga. Los polvos de reacción alcalina pueden actuar como aceleradores.

b) La viscosidad crece, naturalmente, con la cantidad de la carga. La preparación de la carga puede ser mayor para las cargas de grano grueso que para las de grano fino.

c) El calor producido durante la reacción de endurecimiento se evacúa mejor en las resinas a las que se han adicionado cargas: de ello resulta que son menos probables las sobreelevaciones locales de temperatura.

d) la contracción de volumen es tanto menos pronunciada cuanto mayor es la proporción de la carga utilizada.

Estas son indicaciones generales, pero resulta evidente que los efectos se manifiestan más o menos según el grosor y forma de los granos, pureza de las cargas y forma de preparación, etc.

En lo que concierne a la elaboración y a la aptitud de las resinas adicionadas con cargas para la colada, resultan determinantes el tipo de resina empleado y la presencia de diluyentes reactivos, flexibilizadores y aceleradores. Las temperaturas a las que se realiza la mezcla, deben fijarse según el tipo de endurecedor elegido. La adición de la carga seca produce diferencias en lo que concierne a su reticulación por la resina, la tendencia más o menos marcada a las precipitaciones (sedimentación) o a la aglomeración y a la viscosidad.

Como comparación de las propiedades de una misma resina epoxídica, adicionada con diferentes cargas, se puede decir lo siguiente:

a) La *calcita* es la que tiene la influencia más favorable en lo que se refiere a la viscosidad, pero provoca el calentamiento mayor durante la operación de endurecimiento; por lo tanto, este polvo es mal conductor del calor.

b) El *corindón* es buen conductor del calor pero tiene tendencia a provocar una fuerte sedimentación.

c) La *harina de esteatita* procura buenas propiedades mecánicas y eléctricas, pero tienen el inconveniente de aumentar bastante la viscosidad; por consiguiente, debe limitarse la proporción de este material si se quiere emplear como carga.

d) La *harina de cuarzo* es la carga más corrientemente utilizada; permite obtener buenas propiedades mecánicas y eléctricas, con pequeña tendencia a la sedimentación. Resulta un valor relativamente elevado del factor de pérdidas dieléctricas.

En la tabla de la página siguiente, se expresan las propiedades de las resinas epoxídicas, con diferentes cargas, en las que se ha utilizado la siguiente composición básica:

100 partes en peso de resina pura
70 partes en peso de endurecedor
0,5 partes en peso de acelerador
250 partes en peso de carga

Resumen. En el estado actual de la técnica de las resinas epoxídicas se puede decir que tienen muy buena resistencia mecánica y química, resisten bien los ácidos minerales y orgánicos, la sal, los álcolis y los disolventes como el alcohol, bencina, benzol, etc. Poseen también buena resistencia al calor y al fuego y tienen excelentes propiedades dieléctricas. Téngase en cuenta, además, que todavía no está completamente desarrollado el estudio y posibilidades de estos materiales, por lo que cabe suponer que las propiedades citadas anteriormente se irán perfeccionando a medida que se vayan descubriendo nuevas resinas y se investiguen mejor las propiedades de las cargas que pueden adicionarse. Muy posiblemente, las resinas epoxídicas constituyen los materiales aislantes de mayor porvenir en Electrotecnia y, por esta razón, hemos dedicado un estudio bastante extenso a estos materiales, ya que creemos que resultan muy interesantes para los profesionales electricistas.

Aplicaciones de las resinas epoxídicas. Con las resinas epoxídicas líquidas se fabrican barnices aislantes muy adherentes y de gran resistencia a la abrasión, a la humedad y a los agentes químicos.

Las resinas epoxídicas sólidas han encontrado una aplicación específica en la fabricación de transformadores de medida para tensiones hasta unos 80 kV hasta tal punto que en las instalaciones interiores han sustituido casi totalmente a sus predecesores, los transformadores de medida aislados con aceite, con gases inertes, etc. Para

TABLA 46. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS EPOXÍDICAS CARGADAS

Características	Corindón	Resina epoxídica cargada con					
		Harina de cuarzo	Polvo de cuarzo	Harina de esteatita	Calcita	Oxido de calcio	Dolomita
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	800	900	970	1 050	640	800	640
Temperatura máxima de endurecimiento, en °C	130	143	144	156	158	152	138
Temperatura de deformación, en °C	81	83	88	83	80	86	81
Constante dieléctrica ε, a 20 °C y 50 Hz	5,1	3,1	4,1	4	4,7	3,5	4,3
Factor de pérdidas (tang δ), a 20 °C y 50 Hz	0,02	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05
Resistencia a la corriente de fuga	Excepcional	Buena	Buena	Buena	Mediana	Buena	Buena

fabricar estos transformadores, el núcleo y los arrollamientos se colocan dentro de moldes, se impregnan y se rellenan de resina los citados moldes; esta forma de trabajo queda muy facilitada por la escasa contracción de volumen. En esta fabricación, la resina se carga con harina de cuarzo y el conjunto resulta un bloque compacto, muy homogéneo y resistente a los esfuerzos mecánicos, a los agentes químicos y a las solicitaciones eléctricas.

También han dado buen resultado las resinas epoxídicas en el aislamiento de las barras de generadores de alta tensión y en todos aquellos casos en que el material que constituye el aislamiento conviene que forme bloque compacto, duro y muy resistente, con los materiales conductores.

Plásticos magnéticos

La principal aplicación de los materiales plásticos en la industria electrotécnica es como aislantes (barnices, productos moldeados, productos laminados, etc.). Sin embargo, en recientes investigaciones se han descubierto materiales plásticos *con propiedades magnéticas*, que aun están en período de estudio pero cuya aparición en el mercado obligará a una reconsideración de los criterios seguidos hasta ahora para la construcción de equipos eléctricos y electrónicos. Aunque, por el momento, no se pueden prever todas las posibles aplicaciones industriales de estos materiales, sí se puede orientar al lector sobre algunos de estos posibles campos de aplicación:

a) Imanes plásticos
b) Semiconductores orgánicos
c) Baterías de pilas y de acumuladores no metálicos
d) Tamices electrónicos
e) Patrones de frecuencia y de campo magnético
f) Soldadura plástico-metal
g) Recubrimientos especiales.

Para comprender mejor la estructura y características de los materiales plásticos magnéticos, es preciso recordar algunos conceptos, ya desarrollados en esta obra, pero que resumimos a continuación.

Recordaremos que cuando un cuerpo se introduce en un campo magnético (por ejemplo entre los polvos de un imán) puede ocurrir dos cosas:

a) que el cuerpo quede rechazado por el imán. Se dice que el cuerpo es diamagnético.

b) que el cuerpo quede atraído por el imán. El cuerpo es, en este caso, paramagnético.

Se ha comprobado que *no existen cuerpos magnéticamente neutros*. Más aun: *La materia es, por sí misma, diamagnética*. El paramagnetismo es una excepción, y significa siempre un desequilibrio, una descompensación en la estructura de la materia.

Recordemos también que toda corriente eléctrica origina un campo magnético. Y como la corriente eléctrica no es más que el conjunto de cargas eléctricas (los electrones) en movimiento, se puede deducir que *cualquier carga eléctrica en movimiento origina un campo magnético*.

Como sabemos los átomos de todos los cuerpos están constituidos por un núcleo cargado positivamente y varios electrones cargados negativamente que giran, en distintas órbitas, alrededor de dicho núcleo. Además, los electrones también giran sobre sí mismos. Es decir, que un electrón tiene un movimiento de rotación sobre su propio eje, y un movimiento de traslación alrededor del núcleo central.

Por consiguiente, el electrón es una partícula cargada, que se mueve; por lo tanto, originará dos pequeñísimos campos magnéticos,

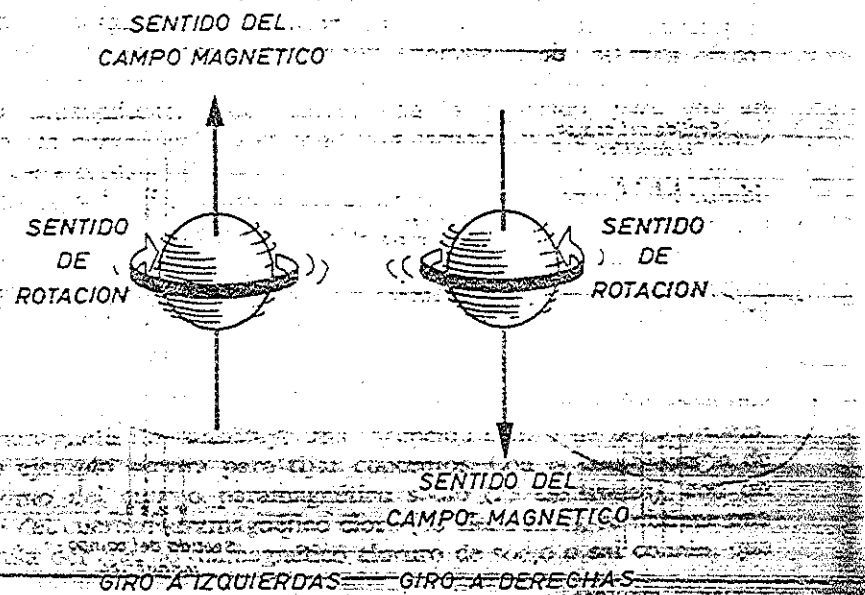


Fig. 74. — Campo magnético producido por el movimiento de rotación de un electrón.

correspondientes a cada uno de sus movimientos (rotación y traslación). El campo magnético producido por el movimiento de rotación se denomina *spin magnético*, y podemos suponer que tiene su origen en la circulación de la carga alrededor del eje del electrón: el sentido de las líneas de fuerza estará determinado por el sentido de giro (a derechas o a izquierdas) del electrón (véase figura 74). El otro campo magnético (Fig. 75) está determinado por el movimiento de la carga negativa del electrón alrededor del núcleo atómico; también se puede determinar fácilmente el sentido de las líneas del campo magnético.

El núcleo, cargado positivamente, también tiene su campo magnético propio, pero éste es unas mil veces inferior a los campos magnéticos originados por el electrón, ya que sus movimientos son mucho más lentos, debido a su mayor masa. En lo que sigue, se prescindirá de este campo magnético nuclear ya que las propiedades magnéticas de los cuerpos dependen, casi exclusivamente, de los campos magnéticos electrónicos.

Se ha comprobado experimentalmente que, en todos los cuerpos, el número de electrones que giran a derechas tiende a ser igual al número de electrones que giran en sentido contrario. Esto quiere decir que, en un cuerpo determinado, casi siempre ocurre que la mitad de estos electrones giran a derechas, y la otra mitad giran a izquierdas; esto es válido tanto para los movimientos de rotación como para los de traslación.

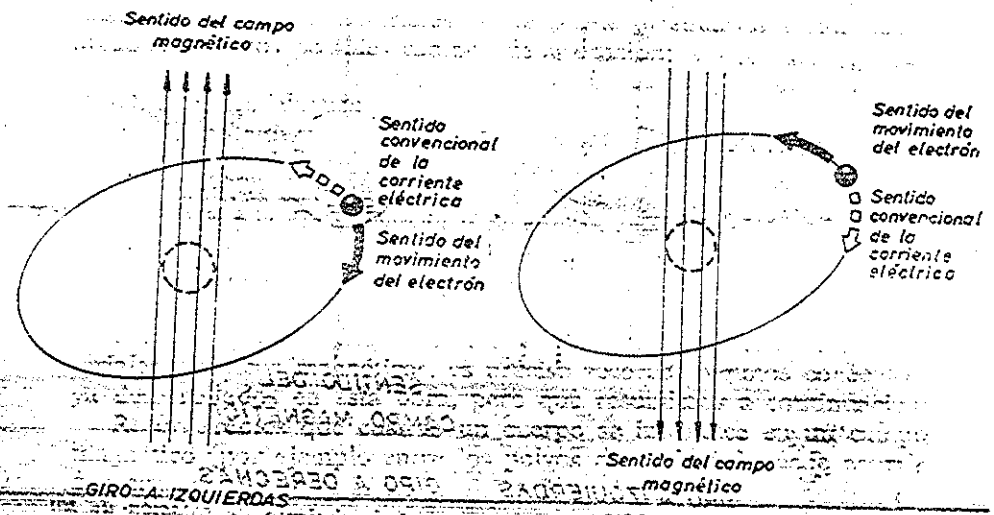


Fig. 75.—Campo magnético producido por el movimiento de traslación de un electrón alrededor del núcleo atómico.

Es decir que en un cuerpo cuyas moléculas tengan un número par de electrones, los campos magnéticos de esos electrones se compensan, incluso en presencia de un campo magnético. Se habría de obtener, por lo tanto, un cuerpo magnéticamente neutro; pero no sucede así, porque al introducir este cuerpo en un campo magnético, y de acuerdo con la ley de Lenz, la creación de las cargas eléctricas de los electrones con dicho campo magnético provoca la formación de otro campo magnético, cuyas líneas de campo tienen sentido opuesto a las del anterior: de esta forma, el cuerpo es rechazado por el campo magnético exterior. Se trata, por lo tanto, de un *cuerpo diamagnético*.

Si ahora, y por un procedimiento cualquiera, físico o químico, se quita un electrón a un cuerpo que tiene un número par de electrones, este cuerpo queda magnéticamente descompensado, puesto que hay un electrón sobrante cuyo campo magnético no está equilibrado con otro campo magnético de sentido opuesto. Si, en estas condiciones, se introduce este cuerpo en un campo magnético, sucederán simultáneamente dos cosas:

a) se producirá un campo magnético de sentido opuesto al del campo exterior, por efecto de la reacción entre las cargas eléctricas del cuerpo y el campo (diamagnetismo).

b) los campos magnéticos de los electrones libres se orientarán en la dirección de las líneas del campo exterior (paramagnetismo).

Como el segundo de los efectos citados es mucho mayor que el primero, el cuerpo será atraído por el imán productor del campo magnético. Es decir, que se trata de un *cuerpo paramagnético*.

Por consiguiente, y de acuerdo con lo explicado, *para que un cuerpo sea paramagnético es condición esencial que tenga un número impar de electrones.*

Esto es aplicable, tanto a los cuerpos simples como a las combinaciones de estos cuerpos simples. Es decir que si se combinan dos cuerpos simples, reuniendo sus átomos para formar la *molécula* de un cuerpo compuesto, comparten sus electrones. Si la molécula resultante tiene un número par de electrones, el cuerpo compuesto será diamagnético; y el cuerpo compuesto será paramagnético en caso contrario. Pero los cuerpos compuestos cuyas moléculas tienen un número impar de electrones, son muy raros; y es por esta razón que el paramagnetismo constituye una excepción dentro de la naturaleza.

Un ejemplo servirá para fijar conceptos. Con la combinación de un átomo del cuerpo paramagnético sodio (23 electrones), con un átomo del cuerpo paramagnético cloro (35 electrones), se obtiene una molécula del cuerpo diamagnético cloruro de sodio o sal común, que tiene

$$23 + 35 = 58 \text{ electrones (número par)}$$

Los *compuestos orgánicos saturados son diamagnéticos*, ya que, por tener la órbita exterior del carbono, cuatro electrones, es decir, un número par de ellos, los compuestos saturados tendrán también un número par de electrones. Por ejemplo, el metano, CH_4 tiene un número total de electrones:

1 átomo de carbono	6 electrones
4 átomos de hidrógeno	4 electrones
Total	10 electrones

es decir, un número par y, por lo tanto, el metano es un cuerpo diamagnético.

Por el contrario, *los radicales orgánicos son paramagnéticos* ya que de los cuatro electrones que constituyen la órbita exterior del carbono, hay uno de ellos no completado con otro electrón de otro cuerpo simple. Por ejemplo, el metilo CH_3 tiene un número total de electrones:

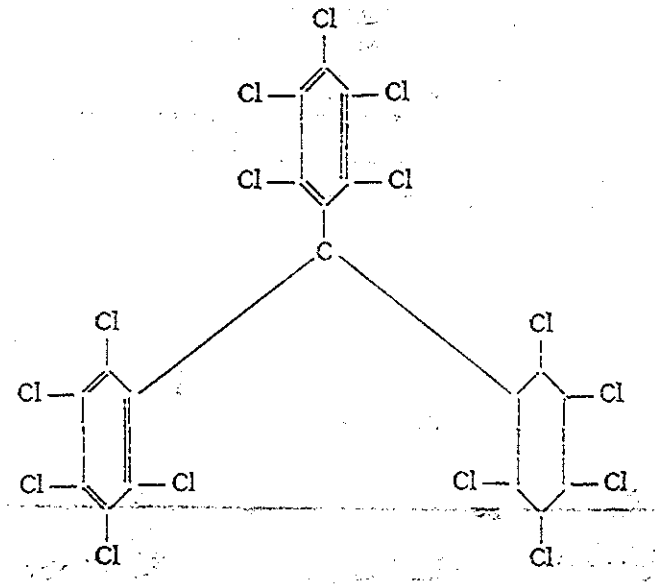
1 átomo de carbono	6 electrones
3 átomos de hidrógeno	3 electrones
Total	9 electrones

o sea, un número impar, lo que quiere decir que el metilo es un cuerpo paramagnético.

Por consiguiente, las mayores dificultades para hallar un plástico magnético están en que tienen que ser polímeros constituidos por radicales orgánicos, es decir, compuestos no saturados; y los radicales orgánicos, por su propia constitución no son estables, ya que sus electrones libres no se combinan fácilmente con los electrones libres de otros átomos y al convertirse un radical orgánico en compuesto saturado, pierde las propiedades paramagnéticas, ya que el número de electrones se hace par, y el cuerpo se convierte en diamagnético.

Tenía que encontrarse, por lo tanto, un tipo de radical orgánico que fuera perfectamente estable, lo que parecía constituir una contradicción. Hará solamente algunos años, un grupo de investigadores españoles dirigidos por el Dr. Ballester, anunciaron haber logrado la síntesis de *radicales orgánicos libres inertes*, es decir, de radicales que pueden existir libremente, sin reaccionar con otros cuerpos para formar compuestos saturados e inertes, lo que quiere decir que conservan sus propiedades físicas y químicas durante largo tiempo.

Todos estos cuerpos eran ya paramagnéticos, pero todavía no podrían considerarse plásticos puesto que no eran moléculas suficientemente grandes. Uno de los radicales inertes más sencillos es el *perclorotrifenilmetilo* (abreviadamente PTM), cuya fórmula estructural es la siguiente



o sea que, en los enlaces del carbono, se han sustituido todos los átomos de hidrógeno por átomos de cloro. Como puede apreciarse, el átomo de carbono central no tiene más que tres de sus electrones de la capa exterior compartidos, lo que quiere decir que este cuerpo es un radical orgánico o compuesto orgánico no saturado.

En la figura 76 se ha dibujado una representación espacial o tridimensional de este cuerpo: las bolas blancas y grandes representan átomos de cloro, las bolas pequeñas y negras, átomos de carbono. Los tres grupos de átomos enlazados con el átomo central de carbono, están girados en el espacio unos 30° C. Nótese, sin embargo, que el átomo de carbono central tiene 3 enlaces abiertos y un enlace libre, lo que significa también un electrón libre. La fórmula abreviada de este compuesto no saturado es

$$C_{19}Cl_{15}$$

Cada átomo de cloro tiene 17 electrones; recordando que el átomo

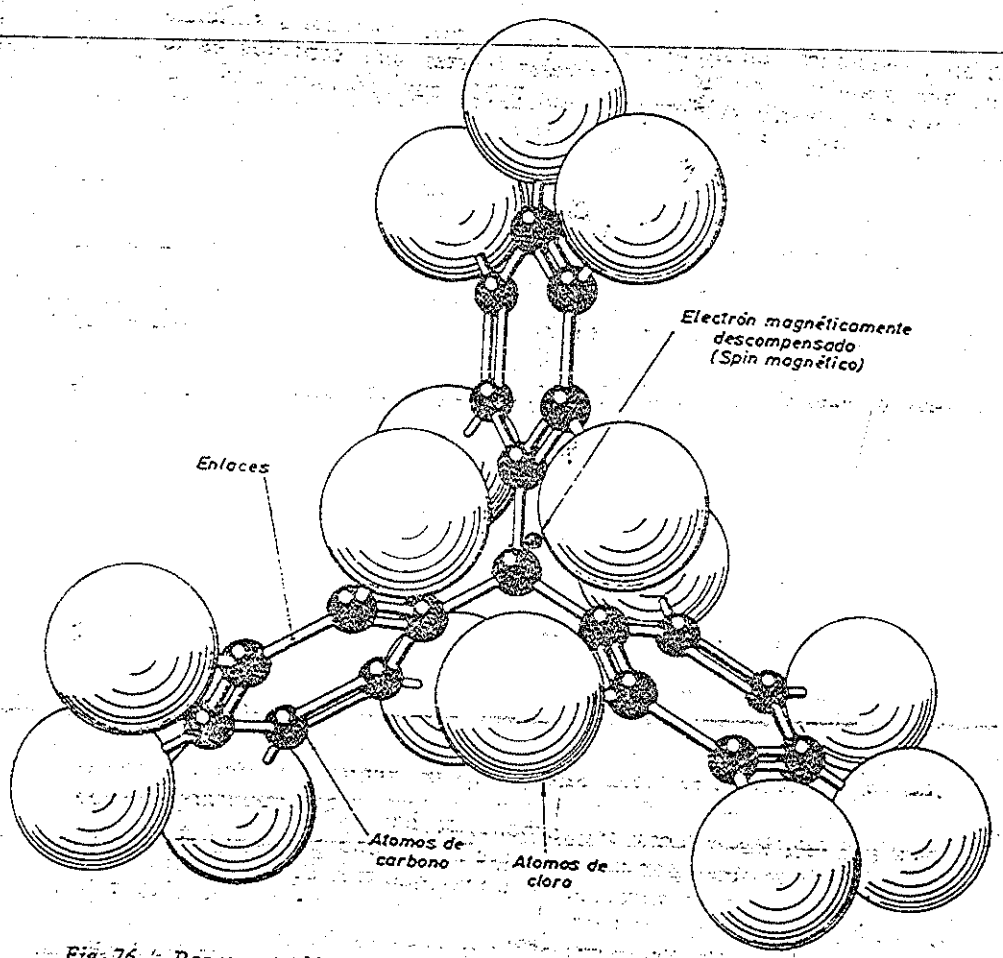


Fig. 76. — Representación espacial de la molécula del perclorotrifenilmetilo.

de carbono tiene 6 electrones, vamos a realizar el recuento de los electrones totales:

19 átomos de carbono a 6 electrones	114 electrones
15 átomos de cloro a 17 electrones	255 electrones
Total	369 electrones

Es decir, un número impar, lo que quiere decir que se trata de un cuerpo paramagnético. Además, tiene las siguientes propiedades:

1. Tiene gran resistencia a los reactivos químicos, incluso a los más enérgicos. Se ha introducido en los ácidos sulfúricos, nítrico y clorhídrico concentrado, sin que se apreciara reacción de ninguna clase.
2. Conserva sus propiedades paramagnéticas durante largo tiempo. Por extrapolación, se ha demostrado que el PTM sigue conservando estas propiedades durante unos 30 años.
3. Tiene gran resistencia térmica, ya que se descompone a una temperatura superior a la de cualquiera de los materiales plásticos actualmente conocidos.
4. Es fuertemente paramagnético, es decir, que en presencia de campos magnéticos es intensamente influenciado por ellos.

El estado actual de las investigaciones realizadas hasta la fecha, es el siguiente:

1.° Se ha realizado lo más difícil, que es la obtención de los radicales libres inertes.
2.° Se han conseguido cadenas poliméricas constituidas por unidades de radicales libres inertes.
3.° Los polímeros polirradicalarios obtenidos, están siendo estudiados para el mejoramiento de sus propiedades fundamentales, aunque el descubrimiento del monómero y su activación ya se ha logrado.

Podría parecer que la polimerización a partir del monómero encontrado, podría dar origen a polímeros alternativamente diamagnéticos y paramagnéticos. En efecto, si el monómero actual tiene 369 electrones, una cadena formada por 10 monómeros activados, tendrá 3690 electrones, es decir, un número par por lo que parece que el polímero resultante habría de ser diamagnético. Esto no sucede así, ya que las investigaciones han demostrado que *absolutamente todos*, los polímeros formados a partir de este monómero son paramagnéticos, pues las moléculas activadas del monómero, en el polímero actúan de forma independiente, de tal manera que, en todos los casos, los efectos paramagnéticos de cada una de estas moléculas, se suman en el polímero resultante. Esto sucede así porque los electrones libres de cada monómero, no se combinan con los de otros monómeros, sino que siguen permaneciendo libres. Por lo tanto, un polímero constituido por 9 unidades no tendrá un electrón libre, sino 9 electrones libres.

Paralelamente a estos estudios, el equipo de investigadores dirigido por el Dr. Ballester, han conseguido también descubrir polímeros no magnéticos, pero con una gran resistencia térmica, ya que su punto de descomposición es de 580° C, muy superior, por lo tanto, al de los materiales plásticos conocidos hasta ahora (los materiales actuales más resistentes al calor tienen un punto de descomposición de unos 350° C). Estos polímeros tienen, además, excepcional resistencia a los reactivos químicos.

De esta forma, en un futuro muy próximo se espera obtener materiales de utilización industrial que, además de las propiedades generales de los plásticos, tengan estas otras características, muy especiales:

a) Buenas propiedades paramagnéticas
b) Buenas propiedades dieléctricas
c) Buenas propiedades térmicas
d) Buenas propiedades químicas
e) Gran duración.

Naturalmente, un material que reúna todas o, por lo menos, algunas de las características reseñadas, está llamado a revolucionar la técnica y aplicaciones de los plásticos en Electrotecnia, por lo que hemos creído oportuno informar a nuestros lectores de la existencia de estos materiales aunque, actualmente, aun no se haya llegado a su utilización industrial.

Resumen general

Se han estudiado los más importantes materiales plásticos que tienen aplicación en Electrotecnia. Aunque, como hemos visto en el parágrafo anterior, existen muy interesantes posibilidades de otro tipo para un futuro próximo, podemos decir que la principal aplicación actual de los plásticos es como materiales aislantes. Pero el mismo número y variedad de los plásticos con aplicaciones prácticas, hace difícil la elección del más adecuado para una determinada aplicación. Por esta razón, nos ha parecido oportuno resumir en la tabla 47, las propiedades de los más importantes plásticos existentes, donde éstos están ordenados alfabéticamente para que el lector pueda, de una sola ojeada, comparar y elegir, si fuere el caso, el más apropiado.

Muchas veces, el precio resultará un factor determinante para la elección de un material plástico. Claro está que los precios son variables y no resultaría de interés proporcionar datos de éstos a nuestros

TABLA 48. PRECIOS RELATIVOS DE LOS PRINCIPALES MATERIALES PLÁSTICOS

Material	Precio relativo
Acetato de celulosa	1,52
Etileno-propileno (Baja tensión)	1,52
Etileno-propileno (Media tensión)	2,24
Nitrocelulosa	1,33
Poliacetato de vinilo	1,33
Policloruro de vinilo (Baja tensión)	1
Policloruro de vinilo (Media tensión)	1,21
Policloruro de vinilo reticulado (Baja tensión)	1,82
Poliestireno	1,52 ... 1,82
Polietileno (Baja tensión)	1,10 ... 1,12
Polietileno (Media tensión)	1,36
Polietileno (Alta tensión)	2,12
Polietileno reticulado (Baja tensión)	1,48
Polietileno reticulado (Media tensión)	1,58
Polimetacrilato de metilo	3,64 ... 5,45
Resinas de caseína	2,12 ... 2,42
Resinas de melamina	2,25 ... 2,50
Resinas de poliéster	2,42 ... 2,73
Resinas fenólicas (baquelitas)	1,21 ... 1,52
Resinas fluoradas	15,15
Resinas ureicas	1,52 ... 1,67

lectores, ya que pronto perderían actualidad. Nos ha parecido más oportuno proporcionar precios relativos, que tienen un valor orientativo para los lectores y cuya variación no parece que vaya a presentar muchos cambios en el futuro. Para ello, hemos elegido como base el policloruro de vinilo, que es el material plástico de mayor producción, y a su precio actual le hemos dado el valor 1. Por comparación de los precios actuales de los demás plásticos con el del policloruro de vinilo, se han obtenido los precios relativos de varios materiales

de esta clase, no de todos los existentes, ya que muchos de ellos aún no se fabrican en España y carecemos de datos que pudiéramos considerar como seguros. Los resultados obtenidos se han resumido en la tabla 48, donde los diferentes materiales están ordenados alfabéticamente.

Para finalizar el presente capítulo, diremos que no se han incluido en él ni los materiales elastómeros (caucho y derivados) ni las siliconas, a los cuales por sus características especiales y por su importancia para el electricista, se dedican otros tantos capítulos independientes.

11 Elastomeros empleados en electrotecnia

Definición y conceptos generales

Los *materiales elastómeros* están caracterizados por su extraordinaria elasticidad: pueden estirarse varias veces en su longitud por efecto de un esfuerzo de tracción y, cuando cesa este esfuerzo, toman casi instantáneamente su forma primitiva, sin deformación y sin que queden alteradas sus propiedades. Generalmente, obtienen esta elasticidad mediante un tratamiento térmico denominado *vulcanización*, descubierto por Charles Goodyear en 1893 y que consiste, esencialmente en la creación de enlaces o puentes entre las cadenas de moléculas que constituyen el elastómero. más adelante, dentro de este mismo capítulo se estudiará con más detalle este proceso.

El material elastómero más conocido es el *caucho natural* que, cuando está vulcanizado recibe también el nombre de *goma*. El lector puede tener una idea intuitiva de lo que es un elastómero como un material de propiedades semejantes a las del caucho.

Los diversos tipos de elastómeros tienen una elasticidad muy variable, sea por la importancia de su alargamiento máximo, sea por la velocidad de su retracción, sea por el valor de su deformación permanente; se ha llegado a definir el grupo de los *elastómeros*, limitando a 150 % el valor mínimo de su alargamiento posible, sin deformación ulterior.

Aunque muchos materiales plásticos, como el policloruro de vinilo reticulado, tienen cierta elasticidad, no pueden considerarse como elastómeros ya que, por no estar vulcanizados, no vuelven a su posición inicial cuando se ha sobrepasado su límite elástico.

También existen materiales que, por su constitución o por las circunstancias en que se ha realizado su fabricación, pueden ser plásticos o elastómeros; en estos casos, se estudian los correspondientes materiales en los capítulos dedicados al estado en que se encuentran con más frecuencia. Por ejemplo, el etileno-propileno, que es un material de las características citadas, se ha estudiado en el capítulo dedicado a los materiales plásticos.

El interés del estudio de los elastómeros para el profesional electricista está en que muchos de estos materiales, además de tener excelentes propiedades dieléctricas, tienen también muy buenas propiedades mecánicas y extraordinaria resistencia a la humedad y otros agentes químicos, por lo que son muy numerosas sus aplicaciones electrotécnicas. Por esta razón nos ha parecido oportuno estudiar, con algún detalle, la estructura general de estos materiales, deduciendo de este estudio sus propiedades y campo de aplicación.

Estructura general de los elastómeros

Por lo general, los elastómeros son compuestos orgánicos constituidos, casi exclusivamente, por átomos de carbono y de hidrógeno y polimerizados convenientemente. Las especiales características de los enlaces entre sus átomos constituyentes explican las propiedades elásticas de los elastómeros. Para comprender mejor esto que decimos, vamos a partir de un compuesto orgánico muy interesante, el *1.3 — butadieno*, cuya fórmula estructural es,

$$CH_2 = CH - CH = CH_2$$

que tiene enlaces dobles en el primer y tercer carbono, como indica su nombre. Este cuerpo tiene tendencia a la *auto-adición* es decir, a polimerizarse en cadenas lineales, de la siguiente forma:

$$CH_2 = CH - CH = CH_2 \rightarrow \left[\leftarrow CH_2 - CH = CH - CH_2 \rightarrow \right]_n$$

El polímero lineal así formado conserva todavía enlaces dobles. La molécula polimérica así formada se presenta como una sucesión de enlaces dobles que son rígidos y proporcionan buenas propiedades mecánicas con enlaces sencillos que son flexibles y dan al cuerpo así formado, las propiedades elásticas que lo caracterizan como elastómero. La proporción de enlaces sencillos es muy importante para determinar el grado de elasticidad del material.

La configuración probable de una molécula de elastómero (figura 77) es un denso apelotonamiento; por efecto de un esfuerzo de

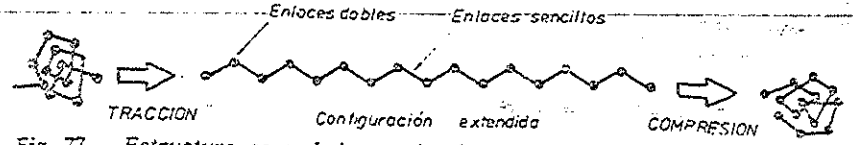


Fig. 77. — Estructura general de un elastómero.

tracción, las cadenas se desenrollan por los enlaces sencillos pero manteniendo puntos fijos rígidos, debidos a los enlaces dobles; pero la deformación es reversible ya que las cadenas son lineales y no existen puntos polares laterales que puedan estabilizar la configuración extendida. Por consiguiente, la característica de elevada elasticidad aparece en los compuestos macromoleculares lineales cuyas cadenas son lo suficientemente flexibles y no ejercen entre sí interacciones intensas.

Pero, la más interesante de las características de los materiales elastómeros es que se pueden modificar sus propiedades mediante la formación de enlaces parciales entre las cadenas poliméricas adyacentes, en la operación denominada *vulcanización* (Fig. 78). Generalmente, con la vulcanización se pretende aumentar la elasticidad del material, a costa de su plasticidad es decir, que, con esta operación, el material se vuelve más duro y elástico y menos expuesto a la deformación plástica permanente. Como agente de vulcanizado, generalmente se emplea el azufre y aunque todavía no se comprende bien el proceso de vulcanización por azufre, es probable que los átomos de azufre actúen como elementos transversales de unión entre las cadenas poliméricas tal como se expresa a continuación:

$$\left[\leftarrow CH_2 - CH = CH - CH_2 \rightarrow \right]_n \qquad \left[\begin{array}{c} \leftarrow CH_2 - CH = CH - CH_2 \rightarrow \\ + S \rightarrow \quad S \quad S \\ \leftarrow CH_2 - CH = CH - CH_2 \rightarrow \end{array} \right]_n$$

$$\left[\leftarrow CH_2 - CH = CH - CH_2 \rightarrow \right]_n$$

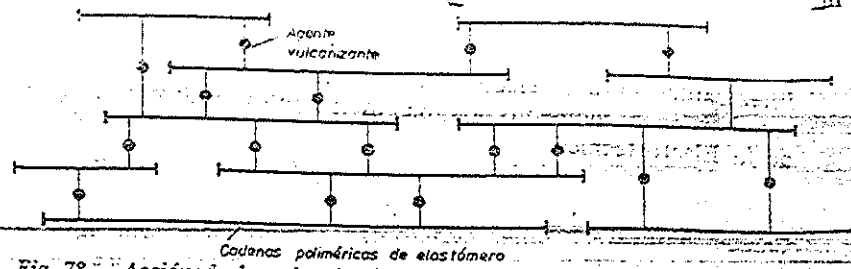


Fig. 78. — Acción de la vulcanización sobre las cadenas poliméricas de un elastómero.

Además del azufre, también se emplean otros agentes vulcanizantes, como se verá más adelante. La distribución de estos puentes disminuye la movilidad relativa de las cadenas poliméricas y contribuye, de esta forma, a dejar sin efecto la deformación exterior. La proporción de agente vulcanizante tiene gran influencia sobre las propiedades del material vulcanizado; si esta proporción es muy elevada puede desaparecer totalmente la elasticidad de la sustancia, en cuanto la trabazón entre sus moléculas sea tan intensa que éstas no puedan deslizarse unas con respecto a otras: la sustancia obtenida es dura, de extraordinarias propiedades mecánicas y eléctricas, pero nada elástica.

Naturalmente, además del 1.3-butadieno también existen otros cuerpos, cuyos polímeros son elastómeros. A continuación se estudiarán los más interesantes de todos ellos, desde el punto de vista de sus aplicaciones electrotécnicas.

Clasificación de los materiales elastómeros

Una primera y amplia clasificación de los materiales elastómeros, en dos grandes grupos, es la siguiente:

1. *Elastómeros naturales*, es decir, que se obtienen a partir de materias primas existentes en la Naturaleza; las operaciones industriales se limitan a mejorar y modificar de alguna forma el producto natural, que se presenta ya en estado de polímero.
2. *Elastómeros sintéticos*, es decir, los obtenidos industrialmente por polimerización de los monómeros correspondientes.

Los elastómeros naturales más importantes son el *caucho natural* la *gutapercha* y la *balata*, que se estudiarán en momento oportuno.

La industria de los elastómeros sintéticos ha obtenido gran incremento en estos últimos años y resulta casi imposible intentar una clasificación racional de los numerosos productos existentes en el mercado sobre todo si se tiene en cuenta que muchos de ellos no son interesantes para el electricista; por esta razón, nos limitaremos a estudiar, en su momento, los más interesantes desde el punto de vista de la Electrotécnica.

Caucho natural

El *caucho natural* es un hidrocarburo, es decir, un compuesto que solamente contiene carbono e hidrógeno. El monómero básico es el

cuerpo denominado *isopreno* o, también *2-metil-1.3-butadieno*, derivado del 1.3-butadieno citado anteriormente, y cuya fórmula estructural es la siguiente,

$$CH_2 = \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} - CH = CH_2$$

La Naturaleza emplea el esqueleto del isopreno.

$$C - \underset{\displaystyle C}{\underset{|}{C}} - C - C$$

en la estructura de un número enorme de compuestos de gran importancia para la vida humana: moléculas de caucho, pigmentos coloreados naturales, aceites esenciales empleados en perfumería, etc., hasta el extremo de que se habla ya de una *química del isopreno*. Nótese la existencia alternativa de enlaces sencillos y dobles en la molécula del isopreno, que caracteriza, como hemos dicho anteriormente, a los materiales elastómeros.

El estudio químico del caucho demuestra que es un polímero lineal del isopreno, con un peso molecular medio de 300 000. En el isopreno se produce una reordenación de enlaces

$$CH_2 = \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} - CH = CH_2 \rightarrow \quad \leftarrow CH_2 - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} = CH - CH_2 \rightarrow$$

y por polimerización se obtiene el caucho natural,

$$\left[\leftarrow CH_2 - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} = CH - CH_2 \frac{\cdot}{\cdot} CH_2 - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} = CH - CH_2 \frac{\cdot}{\cdot}\right.$$

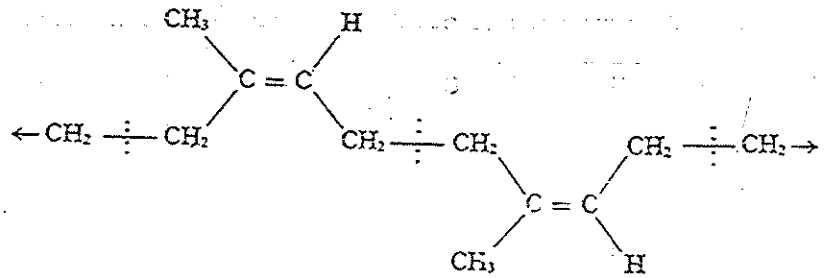
$$\left. CH_2 - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} = CH - CH_2 \rightarrow \right]_n$$

Nótese que se mantienen, alternativamente, los enlaces sencillos y dobles. Sin embargo, el proceso no es tan sencillo como hemos descrito, como lo prueba el hecho de que por polimerización artificial

del isopreno, se obtiene un caucho sintético (que estudiaremos más adelante) cuyas cualidades elásticas son muy inferiores a las del caucho natural. Parece ser que la causa está en las posiciones de los grupos.

$$-CH_2-CH_2-$$

que, en la molécula de caucho están situados de la siguiente forma:



Ya veremos más adelante que en la gutapercha que tiene la misma fórmula química del caucho, no tiene sin embargo las mismas propiedades por la diferente situación de los grupos $-CH_2-CH_2-$ (estos cuerpos de la misma fórmula química y diferentes propiedades se denominan *isómeros*).

El caucho se encuentra en una relación de 27 a 40 % en un líquido de aspecto lechoso, denominado *látex* que se extrae de diversas plantas tropicales, la más importante de las cuales es el árbol llamado *Hevea Brasiliensis*. El látex se extrae por medio de incisiones realizadas en su tronco y coagula espontáneamente algunas horas después de su extracción y por esto es preciso tratarlo con dos objetivos: acidificarlo para precipitar el caucho o estabilizarlo para su transporte y utilización como látex. De estos dos tratamientos, el más interesante para nuestro estudio es el que se refiere a la obtención del caucho natural.

El *caucho natural* se obtiene a partir del látex empleando como acidificante el ácido acético al 1 % o el ácido fórmico al 0,5 %; estas sustancias coagulan el caucho, que se deposita formando una lámina continua.

El caucho natural tiene un peso específico de 0,91 kg/cm³ y una conductividad eléctrica muy baja. Pero tiene también dos defectos fundamentales: no tiene suficiente plasticidad para ser moldeado y resulta muy sensible a los agentes atmosféricos: se oxida con el oxígeno del aire, envejece con la luz solar, se ablanda con el calor y se endurece con el frío. En estas condiciones, no es apto para ser utilizado con fines electrotécnicos.

La plasticidad se obtiene mediante la operación de *masticación* que consiste en desmenuzar el caucho en una malaxadora constituida por un cilindro erizado de puntas, que gira en el interior de otro cilindro, también con puntas, y que se entrecruzan con las del cilindro anterior.

Una vez moldeado, la elasticidad del caucho natural aumenta considerablemente mediante la *vulcanización*, ya citada en un parágrafo anterior. Con esta operación, se obtiene un nuevo material, el *caucho vulcanizado*, de características muy diferentes a las del caucho natural y del que se habla a continuación.

Caucho vulcanizado

Mediante la *vulcanización*, el caucho natural se convierte en un material de superior elasticidad, mayor resistencia mecánica, mayor duración, y mayor resistencia a la temperatura, a la humedad y a los disolventes. Anteriormente se ha estudiado el proceso general de la vulcanización de los materiales elastómeros. Para el caucho, como agente vulcanizante se utiliza, sobre todo, el azufre y, también, otras sustancias tales como el cloruro de azufre, los halógenuros de selenio y de teluro, los disulfuros, las quinonas halogenadas, etc. Actualmente, sigue siendo el azufre el principal agente vulcanizante y a este cuerpo nos referiremos en lo que sigue.

El vulcanizado del caucho natural se realiza amasando caucho con azufre en una proporción mínima de éste de 0,15 % y, cuando la mezcla es homogénea, se calienta la masa hasta temperaturas comprendidas entre 110° C y, 150° C. El azufre se funde y se disuelve parcialmente en el caucho; parece también (es un proceso aún no bien estudiado) que parte del azufre se combina con las moléculas de isopreno que constituyen el caucho, dependiendo el porcentaje de la proporción de caucho, de la temperatura y de la duración de la operación de vulcanizado.

El producto final obtenido depende de la proporción de azufre empleado en la vulcanización. Con una proporción de azufre de 8 a 10 % se obtiene *caucho vulcanizado blando* o *normal*. Con una proporción de 10 a 25 % se obtienen semiebonitas, poco resistentes y poco elásticas. Cuando la proporción de azufre está comprendida entre 25 y 32 % se obtienen las ebonitas, materiales duros, resistentes y poco elásticos, de los que se hablará más adelante.

Para la preparación de los cauchos utilizados en Electrotecnia además de los *agentes vulcanizantes* como el azufre, ya citado, se emplean otros ingredientes, para mejorar sus propiedades mecánicas o eléctricas, para facilitar su fabricación y, en algunos casos, para

reducir su precio. Los más importantes de estos agentes se citan a continuación, advirtiendo que la incorporación de estos ingredientes se realiza aproximadamente, en el mismo orden expuesto, y que la vulcanización es la última operación a la que se somete el caucho: es decir, que, después de la vulcanización, ya no puede realizarse ninguna operación.

Los principales agentes utilizados en la fabricación del caucho para fines electrotécnicos, son los siguientes:

1. *Plastificantes.* Tienen por objeto aumentar la plasticidad de la mezcla para facilitar el modelado y aumentar las propiedades adhesivas del caucho con objeto de que resulte más aglutinante. Como plastificantes, se utilizan los aceites vegetales o minerales (cera, parafina, breas, alquitranes, etc.), los ácidos grasos, la brea de pino y los asfaltos naturales. Se emplean en proporciones que varían de 0,5 a 5 %.

2. *Acelerantes.* Agentes que se añaden a la mezcla para acelerar el proceso de vulcanización, reduciendo la duración del calentamiento. Como acelerante se emplea litargirio, calcio, óxido de magnesio, bases orgánicas, etc. Se añaden en una proporción de 1 %.

3. *Activadores.* La acción de los agentes acelerantes es máxima en presencia de agentes denominados *activadores*, como el óxido de zinc en proporción de 5 %, o el ácido esteárico en proporción de 0,5 a 3 %.

4. *Retardadores.* Se emplean para evitar el tostado del caucho; el más conocido es el ácido salicílico.

5. *Antioxidantes.* Son catalizadores negativos, que retardan la oxidación del caucho, prolongando la duración de sus buenas cualidades. Como antioxidantes se emplean fenoles y aminas aromáticas, en proporciones de 1 a 2 %.

6. *Cargas.* Las *cargas* pueden ser *reforzantes* o *activas* e *inertes*. La misión de las *cargas activas* es mejorar las propiedades mecánicas del caucho, tales como resistencia a la rotura, al desgarro y a la abrasión; el producto más empleado es el *negro de humo*, en proporciones de hasta un 50 % en algunas aplicaciones (por ejemplo, cubiertas para cables). La misión de las *cargas inertes* es abaratar los productos de caucho, ya que aumentan su volumen, a costa de empeorar las propiedades mecánicas; generalmente, se emplean en forma de polvos muy divididos, tales como carbonatos, talco, arcillas,

óxido de zinc, etc. La proporción de estos materiales es muy variable y, en algunas aplicaciones, puede llegar hasta un 50 %.

7. *Otros ingredientes.* Además de los agentes citados, se añaden también a las mezclas otros ingredientes en pequeñas cantidades, que no resultan imprescindibles pero que mejoran determinadas cualidades del caucho. Pueden citarse:

a) *pigmentos*, para dar color a los compuestos de caucho.
b) *abrasivos*, que se incorporan a los cauchos destinados a producir trabajos de abrasión o pulimentación.
c) *ignífugos*, para hacer incombustible al caucho.
d) *odorantes*, para quitar el olor desagradable del caucho vulcanizado (sobre todo, por presencia del azufre).

Las propiedades eléctricas del caucho vulcanizado dependen, sobre todo, de la proporción de azufre. En la figura 79 se muestran las

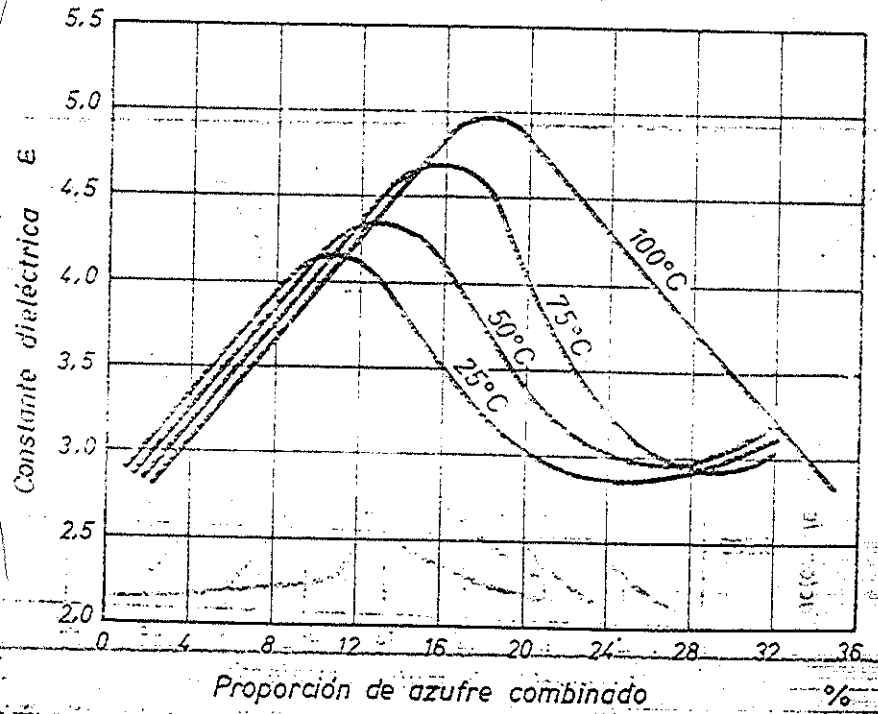


Fig. 79.— Efecto de la proporción de azufre sobre la constante dieléctrica del caucho vulcanizado, a distintas temperaturas de servicio.

curvas de la constante dieléctrica, y en la figura 80 las curvas del factor de pérdidas dieléctricas, en función del contenido de azufre, y para diferentes temperaturas de servicio.

También la naturaleza de las cargas empleadas influyen sobre las propiedades eléctricas del caucho vulcanizado. Véase en la figura 81, el efecto de diversas cargas sobre la constante dieléctrica, y en la figura 82, sobre el factor de pérdidas dieléctricas.

Cuando el caucho vulcanizado se sumerge en agua, absorbe humedad y aumenta de peso. En la figura 83 se expresan los efectos de este hecho sobre la conductividad, la constante dieléctrica y el factor de pérdidas dieléctrico. Se consigue una menor absorción de agua mediante la eliminación de un relleno no reactivo insoluble, con partículas de tamaño adecuado y que contenga un mínimo de gases absorbidos.

La temperatura también tiene gran influencia sobre las propiedades mecánicas del caucho, especialmente, en lo que se refiere a

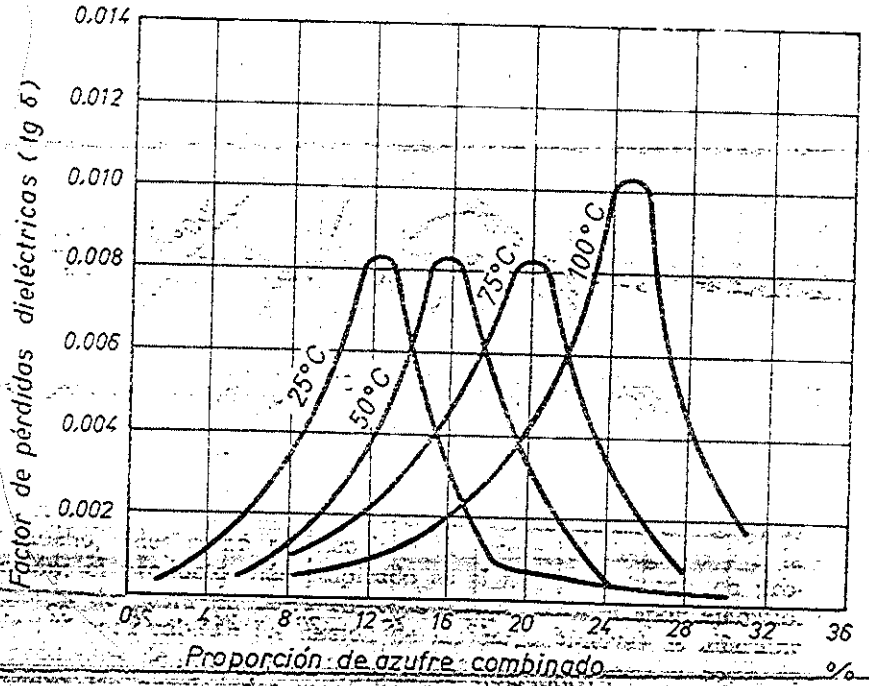


Fig. 80. — Efecto de la proporción de azufre sobre el factor de pérdidas dieléctricas del caucho vulcanizado, a distintas temperaturas de servicio.

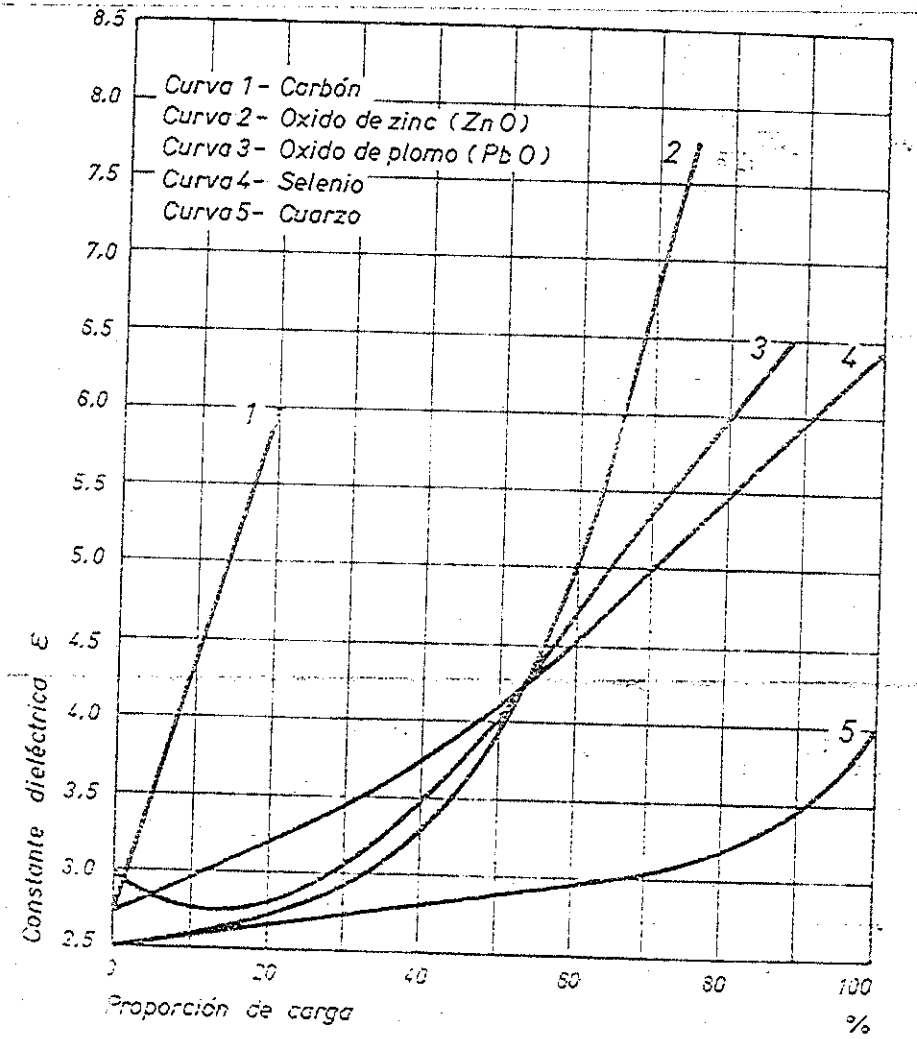


Fig. 81. — Efecto de distintos tipos de rellenos sobre la constante dieléctrica del caucho vulcanizado.

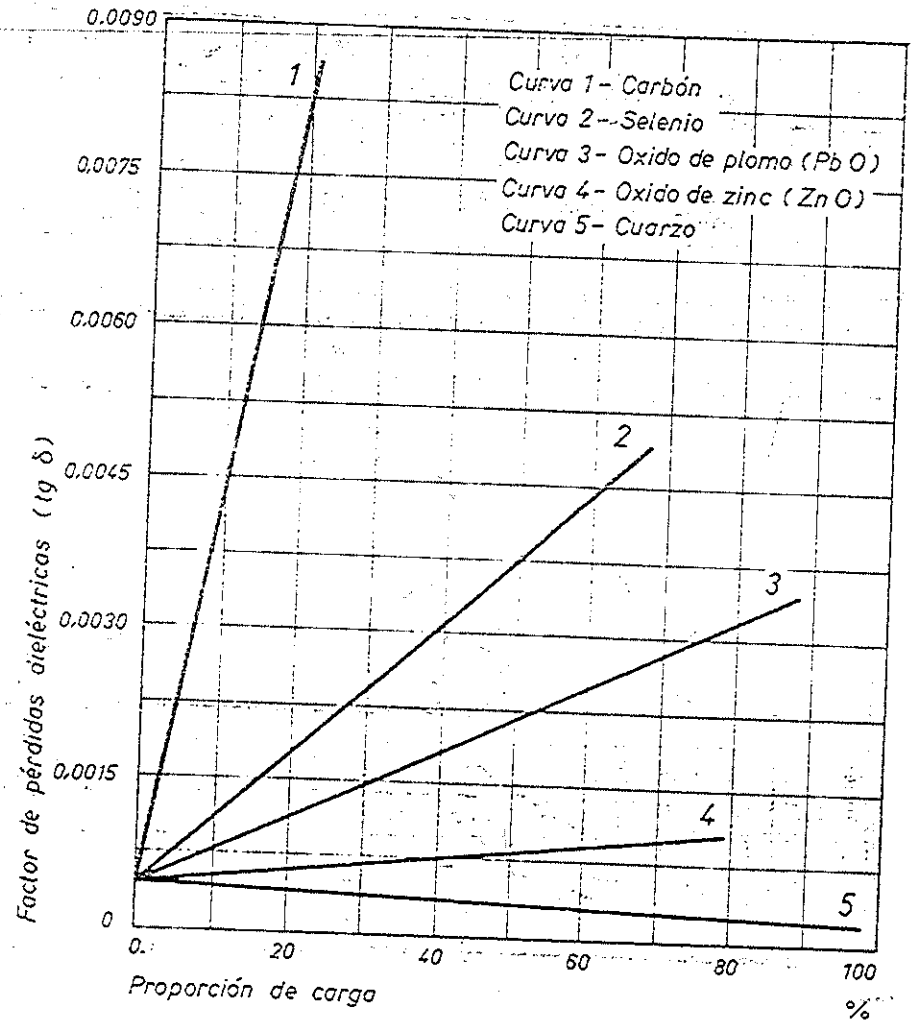


Fig. 82. — Efecto de distintos tipos de rellenos sobre el factor de pérdidas dieléctricas del caucho vulcanizado.

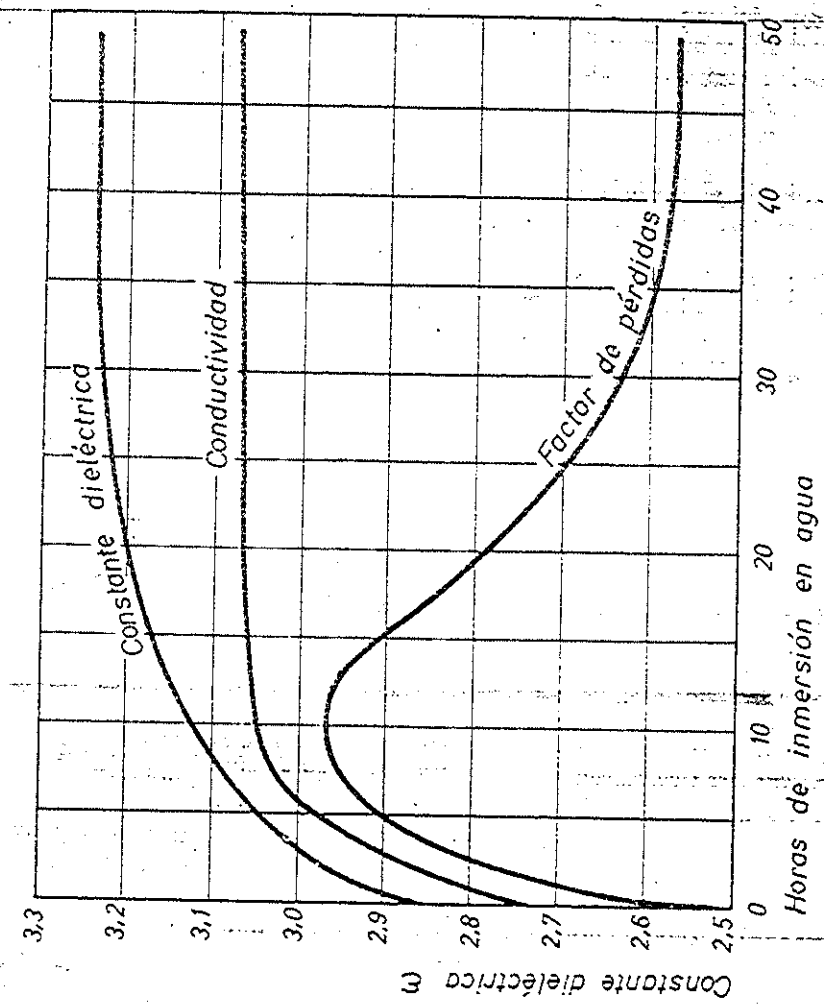


Fig. 83. — Efecto del tiempo de inmersión en agua, sobre la constante dieléctrica, el factor de pérdidas dieléctricas y la conductividad, del caucho vulcanizado.

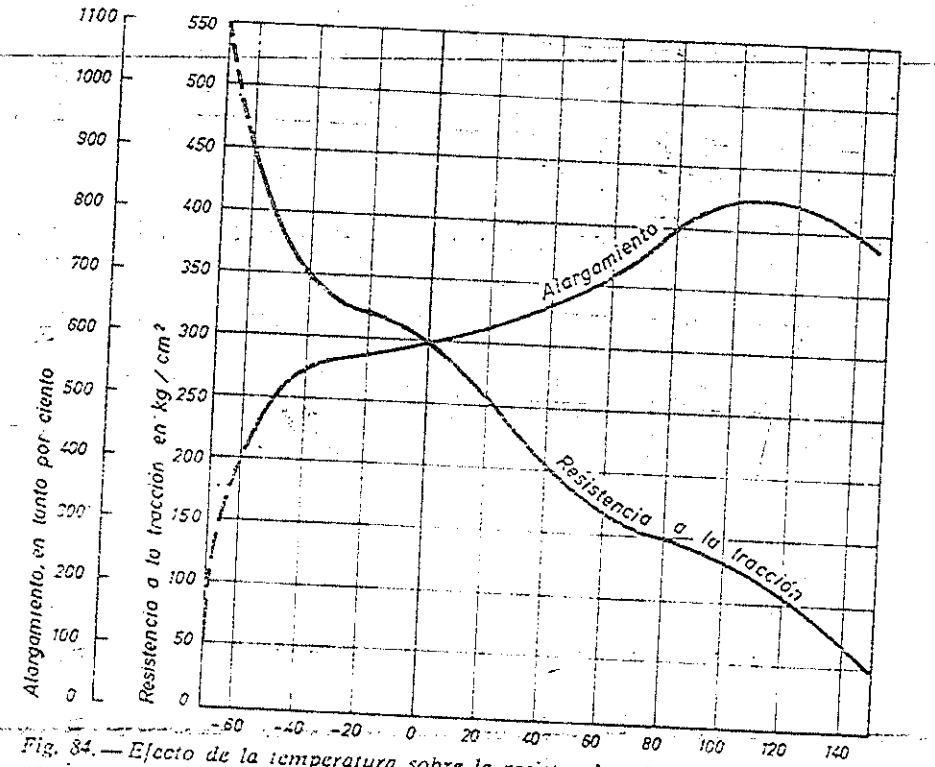


Fig. 84.— Efecto de la temperatura sobre la resistencia a la tracción y el alargamiento, del caucho vulcanizado, relleno de óxido de zinc.

1 DE CURVA.

su resistencia a la tracción. A baja temperatura, el caucho se vuelve rígido, con un aumento de su resistencia a la tracción pero a temperaturas elevadas no tiene prácticamente resistencia. Los diferentes compuestos de caucho estudiados muestran la misma clase de comportamiento con los cambios de temperatura. En la figura 84 se muestran gráficamente los resultados obtenidos en un compuesto vulcanizado, constituido por 100 partes en peso de caucho, 3 partes de azufre, 130 partes de óxido de zinc, 3 partes de ácido esteárico y 0,6 partes de mercaptobenzotiazol, vulcanizado a 141° C, durante 45 minutos.

Uno de los agentes que más activamente provocan el deterioro de los aislamientos de caucho, es el ozono, el cual resulta particularmente activo cuando la superficie está en tensión, produciendo, grietas que causan la perforación. La presencia de ozono puede ser debida al campo electrostático, a la ionización del aire (efecto corona) a la luz solar o a la luz ultravioleta. El deterioro del aislamiento

de caucho puede evitarse con una composición especial de caucho, aceites o betunes, o aplicando capas de barnices, de ceras o de cauchos sintéticos, que tienen mayor resistencia a este agente.

LO MAS IMPORTANTE.

Como resumen y con vistas a sus aplicaciones electrotécnicas, puede decirse que el caucho vulcanizado es muy elástico, tiene elevada resistencia a la tracción, mucho alargamiento a la rotura y se recobra rápidamente después de extendido. Muy resistente a la abrasión. Buenas propiedades dieléctricas. Buena resistencia a los ácidos y álcalis tanto diluidos como concentrados, buena resistencia al alcohol y mala a la bencina y a los aceites minerales y orgánicos. Para el aislamiento de conductores de cobre, ha de tenerse en cuenta que se producen reacciones químicas entre el cobre y el caucho cuando están en contacto directo, lo que provoca a la larga la destrucción de este último material: por esta razón, en los conductores de cobre aislados con caucho, debe estañarse el cobre.

Los aislantes usuales para conductores, contienen un 20 % de caucho, como mínimo; los aislantes de buena calidad, un 30 % de caucho y los de calidad superior, un 40 %; las cubiertas de conductores portátiles, sujetas a desgaste mecánico por abrasión, pueden contener hasta un 60 % de caucho.

Además de los aislamientos para conductores, también se fabrican de caucho diversos objetos tales como alfombras aislantes, guantes protectores para trabajos bajo tensión, etc.

Modernamente, el caucho vulcanizado tiende a sustituir en parte, a la gutapercha en los aislamientos para cables telefónicos y telegráficos submarinos.

También se emplean cintas aislantes de goma, para su empleo en los empalmes aislados de conductores eléctricos. Estas cintas se hacen de un compuesto de caucho, con un 0,5 % de azufre como máximo.

En la tabla de la página siguiente, se expresan las principales propiedades mecánicas físicas, químicas y eléctricas, de diversos tipos de caucho vulcanizado.

Ebonita

La ebonita no es un material elastómero pero como se fabrica a partir del caucho natural, nos ha parecido oportuno estudiarla aquí, dada la gran importancia que tiene este material desde el punto de vista electrotécnico.

El nombre alude a su color negro que recuerda al ebano, también se conoce este material con los nombres de *caucho duro* y de *goma dura*.

TABLA 49. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL CAUCHO NATURAL VULCANIZADO

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	0,95
	Resistencia a la tracción, en kg/cm²	200 ... 300
	Carga de rotura, en kg/cm²	500
	Alargamiento a la rotura, en %	600 ... 700
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	50 ... 60
	Temperatura de fragilidad, en °C	— 35
	Resistencia a la llama	Mala
	Absorción de agua en 24 horas, en %	2,4
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{16}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	25 ... 30
	Constante dieléctrica ε a 50 Hz	2,5 ... 2,9
	Constante dieléctrica ε a 1 MHz	2,4 ... 2,7
	Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz	0,004
	Factor de pérdidas (tg δ) a 1 MHz	0,004
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Mediana
	Resistencia a la humedad	Buena
	Resistencia a los ácidos débiles y fuertes	Muy buena
	Resistencia a los álcalis débiles y fuertes	Muy buena
	Resistencia a los aceites y grasas minerales	Mala
	Resistencia al alcohol	Muy buena
	Resistencia a la bencina y disolventes orgánicos	Mala

Está formada por una mezcla de caucho y azufre, en la proporción de 20 a 40 % de este último. Se fabrica de forma muy parecida al caucho vulcanizado. Las mezclas para la ebonita contienen caucho bruto, que no es necesario que sea de tan buena calidad como para el caucho vulcanizado. La vulcanización de la mezcla se realiza a temperaturas comprendidas entre 140° C y 180° C con presiones de 4 a 5 atmósferas y tiempos comprendidos entre 6 y 12 horas.

Además de las materias básicas —caucho y azufre— se pueden añadir también plastificantes, acelerantes, antioxidantes, cargas mine-

TABLA 50. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA EBONITA

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,1 ... 1,8
	Resistencia a la tracción, en kg/cm²	200 ... 700
	Resistencia a la compresión, en kg/cm²	100 ... 500
	Resistencia a la flexión, en kg/cm²	560 ... 1 000
	Alargamiento a la rotura, en %	8 ... 15
	Temperatura máxima de trabajo continuo, en °C	60
	Resistencia a la llama	Mala
	Absorción de agua en 24 horas, en %	0,50
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{14}
	Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	20 ... 25
	Constante dieléctrica ε a 50 Hz	2,8 ... 3,5
	Constante dieléctrica ε a 1 MHz	3
	Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz	0,004 ... 0,005
	Factor de pérdidas (tg δ) a 1 MHz	0,006 ... 0,020
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	Resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico	Regular
	Resistencia a la humedad	Muy buena
	Resistencia a los ácidos débiles y fuertes	Muy buena
	Resistencia a los álcalis débiles y fuertes	Muy buena
	Resistencia a los aceites y grasas minerales	Mala
	Resistencia al alcohol	Muy buena
	Resistencia a la bencina y disolventes orgánicos	Mala

rales activas (negro de humo) y cargas inertas (creta, ebonita en polvo, etc.). También pueden añadirse diversas sustancias colorantes. Todas estas sustancias deben agregarse y mezclarse antes de la vulcanización que, como en el caso del caucho, constituye la operación final.

La ebonita es un material duro, muy resistente a la tracción y a la compresión y muy fácilmente mecanizable: se fabrica en planchas, tubos, cilindros, arandelas, etc. En estado natural es mate y granulosa pero puede pulimentarse fácilmente, presentando un brillo

muy atractivo. Es un material muy frágil y debe trabajarse con precauciones. Para su mecanizado se emplean herramientas metálicas ordinarias: brocas, sierras de dientes finos, etc. Si se sumerge previamente en agua hirviendo para que se ablande, puede curvarse o doblarse después para darle la forma que se quiera.

Es muy poco higroscópica, pero resulta muy sensible al calor, por lo que no conviene someterla a temperaturas superiores a 80°C. Es combustible pero no arde con facilidad.

Tiene muy buenas propiedades dieléctricas, pero éstas varían mucho con la temperatura de trabajo, con el contenido de cargas y aditivos, etc.

Es extraordinariamente resistente a la mayoría de ácidos (excepto ácidos nítrico y sulfúrico) y de las soluciones alcalinas. Es atacada por el ozono, aunque menos que el caucho vulcanizado; pero se suministran calidades especiales de mayor resistencia a esta sustancia. También es atacada por los aceites y los disolventes orgánicos, aumentando su volumen. Es resistente a las descargas disruptivas, pero se perfora la acción de los arcos intensos.

Todas las cualidades reseñadas, unidas a un precio muy aceptable, hacen que la ebonita sea, desde hace mucho tiempo, uno de los materiales aislantes más empleados en aplicaciones electrotécnicas.

En la tabla 50, se reseñan las más importantes características de la ebonita.

Gutapercha y balata

La *gutapercha* se obtiene por incisión de gran número de árboles y arbustos de la península de Malaca y de las islas de Indonesia. Es decir, su obtención es parecida a la del caucho pero a partir de diferentes plantas. Es un isómero del caucho, es decir, que se parte del mismo monómero, el *isopreno*:

$$CH_2 = \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} - CH = CH_2$$

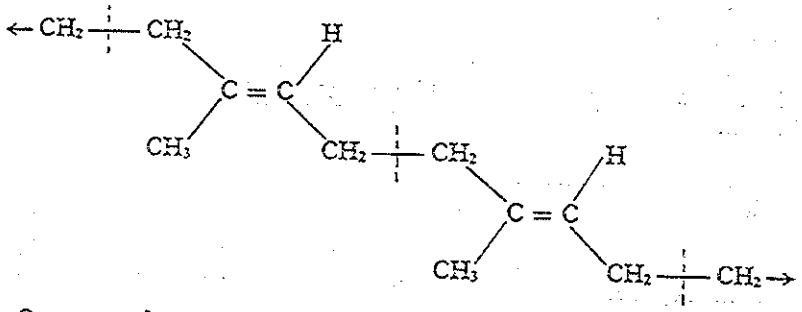
y, por polimerización, se obtiene la gutapercha,

$$\left[\leftarrow CH_2 - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} - CH = CH_2 \rightarrow \right]_n$$

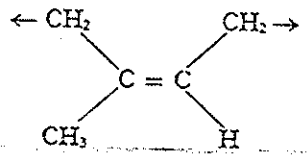
La diferencia estructural con el caucho es que, en el caso de la gutapercha, los grupos

$$- CH_2 - CH_2 -$$

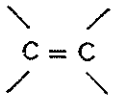
están situados en la cadena polimérica de diferente forma, es decir,



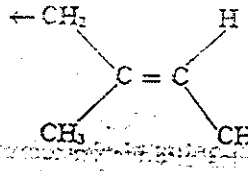
Comparando esta cadena polimérica con la del caucho (véase el párrafo correspondiente) se puede comprobar que, a diferencia de lo que sucedía con el caucho, en que estos grupos estaban situados así,



o sea al mismo lado de los grupos,



en la gutapercha están situados de la siguiente forma,



es decir, a distinto lado.

Esta diferente estructura hace que la gutapercha resulte menos elástica que el caucho ya que en este material, la libertad de rotación alrededor de los enlaces sencillos, es mucho mayor que en el caso de la gutapercha.

El constituyente esencial de la gutapercha es, como se ha dicho el poliisopreno que, en este caso particular se denomina *guta* y que,

como se ha visto es de composición química parecida a la del caucho. Este constituyente es el que hace que la gutapercha sea plástica cuando se calienta y sea dura cuando se enfría y contribuye a hacer de la gutapercha un excelente material aislante.

El aislamiento usual de gutapercha se obtiene combinando y lavando distintas calidades de material crudo, para extraer el polvo y los componentes solubles en el agua. Puede vulcanizarse con azufre o con cloruro de azufre, formando una sustancia dura pero casi siempre se emplea sin vulcanizar.

Es un material de color variable entre gris y pardo. Puede moldearse a presión a temperaturas de 60 a 100° C y funde entre 120 y 140° C. Se evaporiza a partir de 190° C. Resulta parcialmente soluble en el agua. En el aire, se oxida fácilmente, haciéndose quebradiza.

Su principal aplicación es como aislamiento de cables submarinos de transporte de energía eléctrica, telecomunicación, etc.

El factor de pérdidas dieléctricas es máximo a la temperatura ambiente por lo que este valor queda reducido a la temperatura de servicio en el fondo del mar. Si el aislamiento se prepara con 1,5 % de contenido de humedad que es el valor de saturación del agua del mar, las características eléctricas en servicio no varían mucho. Se conserva muy bien bajo el agua (de ahí su principal campo de aplicación) pero, como se ha dicho anteriormente no sucede lo mismo en el aire.

La *balata* se obtiene por incisión en dos especies de árboles de la misma familia botánica que los de la gutapercha, pero existentes solamente en las regiones forestales Sudamericanas. Su constituyente principal es también el poliisopreno; contiene además un 40 % de resinas y alrededor de un 15 % de polvo, humedad y otras impurezas.

Tiene las mismas aplicaciones que la gutapercha; sus propiedades eléctricas son algo mejores pero su precio es más caro.

En la página siguiente, se exponen en una tabla las más interesantes propiedades de la gutapercha.

Otros elastómeros naturales

Además de los materiales citados en los parágrafos anteriores, en la industria electrotécnica también se utilizan otros materiales elastómeros naturales, de los que, a continuación, se reseñan los más importantes:

Látex. El *látex* puede vulcanizarse directamente con polisulfuros o con azufre, antes de su acidificación para obtener el caucho. Esta vulcanización puede acelerarse con ciertos productos orgánicos y,

TABLA 51. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA GUTAPERCHA

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	0,96
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	300
Alargamiento a la rotura, en %	300
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	25×10^{14}
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	10 ... 20
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	3 ... 4
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,002 ... 0,003

también, pueden introducirse diversas cargas de relleno. Después del proceso de vulcanización se deja evaporar el agua, depositándose una película sólida de látex vulcanizado.

El látex presenta las dos siguientes ventajas sobre el caucho:

a) conserva todas las propiedades del producto natural, ya que no sufre ninguna degradación comparable a las plastificaciones mecánicas del caucho ni ninguna elevación importante de temperatura durante su proceso de fabricación.

b) hay gran cantidad de artículos cuya fabricación es más sencilla a partir del látex y, además, tienen mejores propiedades que los artículos análogos de caucho.

El inconveniente de su empleo está en que su transporte resulta más caro, por la cantidad de agua que queda siempre en disolución en la materia prima; además, no soporta la adición de cargas inertes que abaraten el producto final, como es el caso en el caucho.

En Electrotecnia, el látex se utiliza para la impregnación de telas, papel y cordones y para aislamiento de conductores.

Paraguta. Este material consiste, principalmente, en caucho exento de resinas e hidrocarburo de la gutapercha purificado, con adición de otros hidrocarburos especialmente tratados, para modificar sus propiedades mecánicas con reducción del coste. Las proporciones de estos materiales pueden variar entre amplios límites para conseguir determinadas características pero, generalmente, el caucho y la guta entran en proporciones aproximadamente iguales, añadiendo ceras hidrocarbonadas hasta una proporción de 40 %. Mezclando adecua-

damente estos materiales, se obtiene un material aislante elastómero que, en sus propiedades mecánicas se aproxima a la gutapercha y que es absolutamente igual a ésta en lo que se refiere a su estabilidad eléctrica sumergida en el agua. Las aplicaciones de este material son las mismas que las de la gutapercha, es decir, para aislamiento de cables submarinos telefónicos, telegráficos y de transporte de energía, con la ventaja de resultar más económico.

Chatterton. La *pasta* o *compound Chatterton* está constituida por tres partes de gutapercha, una parte de resina y una parte de alquitrán. Es extremadamente adhesivo y se utiliza, principalmente, en dos formas:

a) *varilla de Chatterton*, empleada para obtener orificios, rellenar intersticios entre los conductores de los cables, etc., fundiéndola como el lacre.
b) *cinta de Chatterton*, que es un tejido impregnado de *Chatterton* y que se utiliza para reparar el revestimiento aislante de conductores en empalmes, uniones, etc.

Caucho conductor. El caucho natural (y también los cauchos sintéticos, que se estudiarán más adelante) puede hacerse eléctricamente conductor, añadiendo preparados adecuados. Se pueden obtener resistividades del orden de 0.4 ohmios, cm^2/cm cuando la película se seca a partir del estado líquido. Los materiales de alta resistividad (1 000 ohmios cm^2/cm) tienen la misma dureza que el caucho no conductor; los compuestos de baja resistividad (10 ohmios cm^2/cm) son duros. El valor de la resistividad permanece constante, a no ser que sea sometida a esfuerzos repetidos, en cuyo caso aumenta dicho valor.

El caucho conductor se emplea en unidades de caldeo, blindajes y guarniciones para dispositivos electrónicos. Los materiales de alta resistividad se emplean para disipación de cargas eléctricas.

Conceptos generales sobre los elastómeros sintéticos

Las dos últimas guerras mundiales han sido la causa indirecta del gran impulso recibido en este siglo en la fabricación de los elastómeros sintéticos. En la Primera Guerra Mundial, el bloqueo de Alemania obligó a este país a fabricar caucho sintético para sustituir al caucho natural. En la Segunda Guerra Mundial, fueron los Estados Unidos los que impulsaron la industria de los elastómeros sintéticos, al quedar bloqueado el suministro del caucho natural de Extremo Oriente, que estaba bajo el dominio de los japoneses.

La mayor parte de los materiales elastómeros sintéticos actuales, se fabrican a partir de reacciones de polimerización. Lo más frecuente es que se recurra a polimerizar conjuntamente, dos o más monómeros diferentes, obteniéndose entonces diversos copolímeros en los que las agrupaciones de los diversos monómeros están combinadas químicamente. También es posible preparar algunos elastómeros a partir de reacciones de policondensación.

Aunque existe gran número de cuerpos polimerizables o policondensables, solamente algunos de estos cuerpos son capaces de suministrar sustancias lo suficientemente elásticas para que puedan considerarse materiales elastómeros. Generalmente, se acostumbra a clasificar los elastómeros en los tres grandes grupos siguientes:

1. *Polímeros de diolefinas*
2. *Polímeros de monoolefinas*
3. *Productos obtenidos por policondensación*

que vamos a reseñar seguidamente.

Polímeros de diolefinas

En Química Orgánica se denomina *diolefinas o hidrocarburos diolefínicos*, a los que contienen más de un doble enlace C = C en su estructura molecular.

Se sabe que el caucho natural puede considerarse como el polímero del isopreno,

$$CH_2 = C\ (CH_3) — CH = CH_2$$

que, a su vez, es un derivado del butadieno,

$$CH_2 = CH — CH = CH_2$$

Como puede apreciarse, ambos cuerpos son hidrocarburos diolefínicos, ya que el enlace C = C aparece dos veces en su estructura molecular.

No es extraño, por lo tanto, que las sustancias sintéticas más típicamente elastómeras se encuentren entre los polímeros del butadieno y de sus derivados. Sin embargo, cabe hacer una observación importante: en la biosíntesis del caucho natural, las cadenas isopréticas están unidas en forma de "cabeza-cola" y siempre en el mismo sentido, dando una macromolécula filiforme; por el contrario, se ha comprobado que en la polimerización química pueden producirse

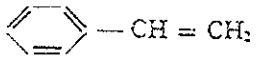
diferentes variantes, de forma que la estructura final está constituida por un conjunto de cadenas, más o menos largas, que presentan ramificaciones y cadenas laterales.

Esta estructura está relacionada con diversas propiedades tecnológicas importantes; también puede deducirse fácilmente que se haya intentado regularizar estas propiedades lo mejor posible los medios actualmente utilizados para ello son: la disminución de la temperatura de polimerización y el empleo de catalizadores especiales.

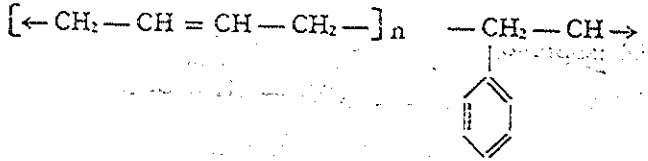
La polimerización del *butadieno* en presencia de sodio inició la era de los elastómeros artificiales: el material obtenido fue denominado *Buna* por los alemanes (BUtadieno-NAtrium). Pero el más importante de los elastómeros sintéticos es el *butadieno estireno* llamado en Alemania *Buna-S* (BUtadieno-NAtrium, catalizados Styrene) denominado en Estados Unidos, *caucho GR-S* (Governement Rubber Styrene), que es un copolímero del *butadieno*.

$$CH_2 = CH - CH = CH_2$$

y del *estireno* o *fenileteno*



y cuya fórmula general, es la siguiente.



De este material se fabrican diferentes tipos comerciales, que se identifican por medio de números que corresponden a las variaciones en las proporciones relativas de monómeros o en las condiciones de polimerización, con objeto de mejorar algunas de las características del producto para su empleo industrial. El tipo comercial más corriente está formado, aproximadamente, por un 76,5 % de butadieno y 23,5 % de estireno. Es el más parecido por sus propiedades al caucho natural; supera a este material en resistencia a la abrasión y resistencia a los aceites derivados del petróleo y le es inferior en resistencia al frío, resistencia mecánica a elevadas temperaturas y deformaciones permanentes. La producción de este caucho representa el 84 % de la producción mundial de caucho sintético, existiendo unas 30 variedades, adecuadas para aplicaciones especiales.

Algunas denominaciones comerciales del butadieno-estireno:

Alemania: *Buna S*
Inglaterra: *S. B. R.*
Estados Unidos: *G. R. S., Hycar OS, Ameripol F*
Canadá: *Polysar Krynol*
U.R.S.S.: *S. K. S.*

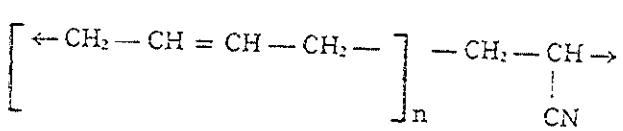
Los copolímeros del *butadieno*,

$$CH_2 = CH - CH = CH_2$$

y del *nitrilo acrílico*

$$CH_2 = CH - CN$$

se denominan cauchos de *butadieno-acrilo nitrilo* y su fórmula general es



y están caracterizados, sobre todo, por su excelente resistencia a los hidrocarburos. Puede aplicarse solo o mezclado con otros elementos que son plastificantes, agentes de vulcanización, antioxidantes, cargas reforzantes, cargas inertes y pigmentos. También se emplea como ingrediente en la mezcla con otros materiales aislantes, como el caucho natural, el policloruro de vinilo, etc. Tienen buena resistencia al ataque fotoquímico y a los aceites y permiten un amplio margen de temperaturas en buenas condiciones de servicio. Eléctricamente son dieléctricos deficientes, por lo que no se emplean normalmente como materiales de aislamiento, pero sí en revestimientos exteriores de conductores eléctricos, debido a sus excelentes cualidades de resistencia a los aceites, a la abrasión y a las altas temperaturas.

Algunas denominaciones comerciales del butadieno-acrilonitrilo:

Alemania: *Buna N, Perbunan*
Estados Unidos: *G. R. A., Hycar OR*
Canadá: *Polysar Krynac*
U.R.S.S.: *S. K. A.*

Un número considerable de otros monómeros se han ensayado para su copolimerización con el butadieno, interviniendo, en algunos

casos, como tercer constituyente. Sin embargo, la mejora de ciertas propiedades, así obtenidas, ha sido casi siempre a expensas de otras características, entre otras, del precio de coste, por lo que ninguno de estos polímeros ha tenido, hasta la fecha éxito comercial.

Además del butadieno, se puede utilizar como monómero básico el *cloropreno*, llamado también 2-cloro-butadieno y cuya fórmula es

$$CH_2 = CCl - CH = CH_2$$

es decir, que solamente difiere del isopreno, citado anteriormente varias veces, por la sustitución del grupo metilo $-CH_3$ por un átomo de cloro.

Su polimerización, en condiciones adecuadas o, en algunos casos, con otros monómeros, proporciona los *policloroprenos*, de fórmula general

$$\left[\leftarrow CH_2 - \underset{\underset{Cl}{|}}{C} = CH - CH_2 \rightarrow \right]_n$$

conocidos también en el mercado, con el nombre de *neoprenos*, de los que existen alrededor de doce tipos diferentes. Los productos vulcanizados tienen buena resistencia a los aceites y, gracias a su contenido de cloro, no propagan la llama (es decir, que son, autoextinguibles). Tienen buenas cualidades mecánicas por lo que se les considera muy adecuados para su empleo en cubiertas exteriores de conductores eléctricos. Tienen también muy buenas propiedades frente al ataque de los diversos agentes químicos y de luz, así como excelentes cualidades térmicas. Como aislante se emplea en cables de baja tensión. Cuando se le adiciona una fuerte proporción de hollín adquiere una excepcional resistencia a la abrasión.

Algunas denominaciones comerciales del policloropreno:

Estados Unidos: *Neoprene, G. R. M.*
U.R.S.S.: *Sovprene*
Francia: *Afcofrene*

En lo que se refiere a los polímeros del isopreno, hasta 1955 solamente presentaban propiedades mediocres, debidas a la irregularidad de su estructura; en la fecha indicada, y en Estados Unidos se encontró un producto extremadamente parecido al caucho natural, que no puede considerarse verdaderamente como un caucho sintético sino como un caucho artificial, ya que no tiene la misma composición química que el producto natural. Este producto tiene diversas denominaciones comerciales: *Ameripol-S.N.*, *Coral-Rubber*, *Natsyn*, etc. y todavía no se ha utilizado de una manera general en la industria electrotécnica.

Polímeros de monoolefinas

Recordemos que, en Química Orgánica se denominan *monoolefinas* o, también *hidrocarburos monoolefínicos*, a los que tienen solamente un doble enlace C = C en su estructura molecular.

Como estos compuestos solamente tienen un doble enlace, los polímeros obtenidos deben dar cadenas lineales saturadas y, por lo tanto, no son vulcanizables. Sin embargo, se ha podido remediar este inconveniente de dos formas:

a) copolimerizando con pequeñas proporciones de una diolefina, de forma que se asocien a la macromolécula un número conveniente de dobles enlaces.
b) utilizando productos que lleven agrupamientos laterales reactivos y que pueden unirse entre sí, directamente o por medio de un agente apropiado, de forma que puedan establecerse los enlaces intermoleculares.

El compuesto más conocido de este grupo es el denominado *caucho butílico* o *butil-caucho*. Se trata de un copolímero del *isobutileno*, cuya fórmula es

$$\begin{array}{c} CH_3 \\ | \\ C = CH_2 \\ | \\ CH_3 \end{array}$$

con el *isopreno*, ya citado en el parágrafo anterior y que se añade en una proporción de 1,5 a 3 %, lo que permite la vulcanización del copolímero. El cuerpo resultante se llama *poli-isobutileno-isopreno* y su fórmula general es

$$\left[\begin{array}{c} CH_3 \\ | \\ \leftarrow CH_2 - C - \\ | \\ CH_3 \end{array} \right]_n \begin{array}{c} CH_3 \\ | \\ - CH - C = CH - CH_2 \rightarrow \end{array}$$

Existe en varios tipos que se diferencian por su plasticidad y la proporción de isopreno. Su mediocre resistencia al ozono hace que sus aplicaciones queden reducidas a revestimientos aislantes para conductores eléctricos, pero sin cubierta de protección no puede ser utilizado a la intemperie, circunstancia que limita sus aplicaciones en alta tensión. Permite temperaturas de trabajo de hasta 90° C y, siempre que su vulcanización sea correcta, tiene unas condiciones elásticas extraordinarias, recuperando su forma anterior después de una deformación por compresión, cuando ha desaparecido la causa que la ha provocado. Tiene una resistencia química superior a la del caucho natural frente a agentes tales como ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, sales metálicas, etc. Tiene también una alta impermeabilidad a los gases.

Algunas denominaciones comerciales del poliisobutileno-isopreno:

Estados Unidos: *G. R. I., Butyl, Hycar 2202, Opanol*
Canadá: *Polysar Butyl*

A partir del material plástico denominado *polietileno*, ~~y que se estudia en otro capítulo de este mismo volumen~~, se puede obtener un elastómero, tratando este material con cantidades convenientes de cloro y de anhídrido sulfuroso. El material obtenido se denomina *polietileno clorosulfonado* y se conoce con el nombre comercial de *Hypalon*. Puede vulcanizarse y el producto vulcanizado se caracteriza por una extraordinaria resistencia al ozono y al oxígeno atmosférico. Sus posibilidades en cuanto a servicios para altas temperaturas, le permiten trabajar en servicio permanente, en la gama comprendida entre −50° C + 120° C, pudiendo alcanzar en servicio intermitente, la temperatura de 150° C. Las propiedades eléctricas permiten su empleo como aislante en los conductores eléctricos para tensiones hasta 600 V; en estos límites es muy conveniente su empleo como revestimiento de cables de mando, hilos de conexión, etc.; para tensiones más elevadas, resulta ventajoso emplear este material por encima de otros materiales aislantes, como cubierta protectora exterior, gracias a su excelente resistencia al ozono, al efecto corona y a las intemperies.

También se utilizan los derivados halogenados del polietileno (por ejemplo el politetrafluoretileno) para la fabricación de elastómeros clorofluorados, los cuales se prestan a aplicaciones especiales en las que se precisa gran resistencia a los agentes destructivos o a temperaturas extremas. Como ejemplo, a continuación se describen brevemente las principales propiedades del polímero, de hidrocarburo fluorado conocido comercialmente con el nombre de *Viton*. Este material tiene buenas propiedades mecánicas, semejantes a las de otros elastómeros sintéticos. Pero resiste elevadas temperaturas de servicio (1 000 horas de funcionamiento continuo a 260° C, ó 500° C en servicio intermitente), conservando todas sus propiedades mecánicas; la temperatura límite inferior de servicio continuo es de −23° C e, incluso, en funcionamiento estático conserva todas sus propiedades mecánicas hasta temperaturas próximas al cero absoluto (−273° C). También es el elastómero con mejor resistencia a los fluidos que existe: resiste muy bien a los aceites, carburantes y lubricantes, a la mayoría de ácidos de ácidos minerales y a gran número de hidrocarburos que disuelven los otros elastómeros. Es relativamente impermeable al aire y a los gases y muy resistente a la abrasión. Es muy resistente al ozono y a los efectos de la oxidación atmosférica. Aunque arde al contacto de una llama, es autoextinguible por lo que no se propaga la llama. Las características eléctricas de este material le hacen muy apropiado como aislante para conductores de baja tensión y baja frecuencia, en aplicaciones en que se exija una resistencia excepcional al calor y a los fluidos.

Elastómeros obtenidos por policondensación

Los elastómeros preparados por policondensación están saturados y para su vulcanización se recurre a procedimientos especiales.

Los más interesantes para el electricista son los polisulfuros orgánicos o *tiokoles*, que se obtienen por la acción de un polisulfuro de sodio (por ejemplo, el $S_4\,Na_2$) sobre hidrocarburos halogenados, por ejemplo, el dicloroetano

$$CH_2\,Cl - CH_2\,Cl$$

El polímero obtenido tiene la fórmula general

$$\left[\leftarrow CH_2 - CH_2 - \underset{\underset{S}{\|}}{S} - \underset{\underset{S}{\|}}{S} \rightarrow \right]_n$$

Su interés está en su inercia química, que los hace prácticamente inmunes a la acción de los disolventes, de la luz solar, del ozono, etc.

Resumen

Como resumen del presente capítulo, a continuación se exponen unas tablas con las características generales de los materiales elas-

tómeros sintéticos estudiados en el presente capítulo, comparándolas con las del caucho natural. De esta forma, el lector interesado en estas cuestiones puede reunir suficientes elementos de juicio para la elección del elastómero más adecuado para una aplicación determinada.

TABLA 52. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL BUTADIENO-ESTIRENO (DENOM. COMERCIALES: BUNA-S,, G. R. S.,, S. B. R. ETC.)

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	0,92 ... 0,98
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	100 ... 300
Alargamiento a la rotura, en %	400 ... 700
Temperatura máxima de servicio continuo, en °C	120 ... 150
Temperatura de fragilidad, en °C	— 35
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{13} ... 10^{15}
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	25 ... 30
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	2,7 ... 4,4
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,017 ... 0,02

TABLA 53. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL BUTADIENO-ACRILONITRILO (DENOM. COMERCIALES: BUNA-N,, PERBUNAN,, G. R. A.,, ETC.)

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	0,96 ... 1,2
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	150 ... 300
Alargamiento a la rotura, en %	300 ... 800
Temperatura máxima de servicio continuo, en °C	120 ... 150
Temperatura de fragilidad, en °C	— 10
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{9} ... 10^{11}
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	15 ... 20
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	13 ... 20
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,04 ... 0,09

TABLA 54. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLICLOROPRENO (DENOM. COMERCIALES: NEOPRENO,, G. R. M.,, ETC.)

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,2 ... 1,5
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	110 ... 250
Alargamiento a la rotura, en %	300 ... 600
Temperatura máxima de servicio continuo, en °C	150
Temperatura de fragilidad, en °C	— 25
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	3×10^{11} ... 6×10^{12}
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	20 ... 30
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	6,5 ... 9
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,03 ... 0,9

TABLA 55. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLISOBUTILENO-ISOPRENO (DENOM. COMERCIALES: CAUCHO BUTÍLICO,, BUTYL,, G. R. I.,, ETCÉTERA)

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	0,91 ... 1,4
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	120 ... 225
Alargamiento a la rotura, en %	550 ... 950
Temperatura máxima de servicio continuo, en °C	150
Temperatura de fragilidad, en °C	— 30
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{18}
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	24 ... 30
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	2,1 ... 2,6
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,0004

TABLA 56. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLIETILENO SULFONADO (DENOM. COMERCIALES: HYPALON)

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,75
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	140 ... 200
Alargamiento a la rotura, en %	300 ... 540
Temperatura máxima de servicio continuo, en °C	135 ... 165
Temperatura de fragilidad, en °C	— 40 ... — 60
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{14}
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	20 ... 30
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	8 ... 10
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,03 ... 0,07

TABLA 57. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL POLIHIDROCARBURO FLUORADO (DENOM. COMERCIALES: VITON)

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,8 ... 1,86
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	140
Alargamiento a la rotura, en %	150 ... 300
Temperatura máxima de servicio continuo, en °C	200
Temperatura de fragilidad, en °C	— 45
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	10^{7}
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	—
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	4 ... 7
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,034

TABLA 58. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS POLISULFUROS ORGÁNICOS (DENOM. COMERCIALES: TIOKOL)

Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,34 ... 1,6
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	60 ... 140
Alargamiento a la rotura, en %	300 ... 700
Temperatura máxima de servicio continuo, en °C	90 ... 150
Temperatura de fragilidad, en °C	—
Resistividad a 20 °C, en ohmios. cm²/cm	—
Rigidez dieléctrica a 20 °C, en kV/mm	—
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	7,5
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,5

TABLA 59. PROPIEDADES DE LOS ELASTÓMEROS EMPLEADOS EN ELECTROTECNIA

Propiedades	Caucho natural vulcanizado	Butadieno-estireno Buna-S G. R. S. S. B. R.	Butadieno-acrilonitrilo Buna-N Perbunan G. R. A.	Policloropreno Neopreno G. R. M. Alcoprene	Polisobutileno-isopreno Caucho butílico Butyl G. R. I.	Polietileno Sulfonado Hypalon	Poli-hidrocarburo fluorado Viton
Capacidad de vulcanización	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Muy buena	Moderada-Buena	—	—
Facilidad de elaboración	Muy buena	Buena	Mediana	Buena	Moderada	Buena	Buena
Extensibilidad	Excelente	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Buena	Buena
Elasticidad	Excelente	Buena	Moderada-Buena	Muy buena	Mediana	Buena	Buena
Tenacidad	Excelente	Moderada-Buena	Buena	Muy buena	Buena	Muy buena	Buena
Impermeabilidad a los gases	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Excelente	Buena	Buena
Impermeabilidad al agua	Buena-Muy buena	Moderada-Buena	Moderada-Buena	Moderada-Buena	Muy buena	Mediana	Muy buena
Resistencia a la abrasión	Muy buena	Buena-Muy buena	Buena-Muy buena	Muy buena	Mediana	Excelente	Muy buena
Resistencia al desgarro	Muy buena	Moderada-Buena	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Muy buena
Resistencia al calor	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Moderada	Muy buena	Excepcional
Resistencia al frío	Muy buena	Muy buena	Moderada-Buena	Buena	Moderada	Excelente	Excelente
Resistencia al aire (O)	Moderada	Buena	Buena	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente
Resistencia al ozono	Mediana	Mediana	Mediana	Buena	Mediana	Excepcional	Buena
Resistencia a la luz	Moderada	Moderada	Mala	Excelente	Excelente	Excelente	Buena
Resistencia a los ácidos diluidos	Buena	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Muy buena	Muy buena
Resistencia a los ácidos fuertes	Moderada	Buena	Moderada	Moderada	Buena	Buena	Buena
Resistencia a los álcalis diluidos	Buena	Buena	Buena	Buena	Muy buena	Muy buena	Muy buena
Resistencia a los álcalis fuertes	Buena	Buena	Buena	Moderada	Muy buena	Muy buena	Buena
Resistencia al alcohol	Buena	Moderada	Moderada	Buena	Excelente	Buena	Buena
Resistencia a los disolventes	Mala	Mala	Moderada	Buena	Mala	Buena	Muy buena
Resistencia a los aceites y grasas	Mala	Mala	Buena	Buena	Mala	Mediana	Muy buena
Resistencia a la llama	Mala	Mala	Mala	Buena	Mala	Muy buena	Excepcional

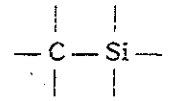
12 Siliconas empleadas en electrotecnia

Definición y conceptos generales

Las *siliconas* constituyen una rama de la familia de los compuestos organosilícicos, compuestos que contienen, a la vez, silicio y grupos orgánicos en los que un átomo de silicio está enlazado, por lo menos, con un átomo de carbono.

Recordamos que, de la misma forma que el oxígeno es el más abundante de los elementos electronegativos (metaloides) de la corteza terrestre, el silicio es el más abundante de los elementos electropositivos (metales). Los dos elementos citados constituyen, en conjunto, cerca del 76 % de la corteza terrestre.

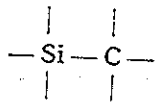
El silicio es tetravalente, como el carbono, por lo que la estructura química de los compuestos silícicos es parecida a la de los compuestos orgánicos. Aun cuando la química orgánica de silicio, es decir, la preparación y estudio de compuestos con el enlace



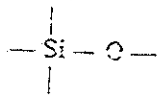
se inició a mediados del pasado siglo, esta familia de compuestos permaneció hasta 1940 constituyendo solamente materia de estudio en los laboratorios. Durante la Segunda Guerra Mundial se descubrió que algunos de los compuestos organosilíceos tenían excepcionales cualidades mecánicas, físico-químicas y eléctricas; en 1943 comenzó la fabricación industrial de estos compuestos por la DOW CORNING

CORPORATION y, en la actualidad existen varias firmas fabricantes de estos productos y su empleo se ha extendido considerablemente dadas sus especiales características.

Las *siliconas* son compuestos organosilícicos, generalmente de elevado peso molecular y las que, además del enlace, común a todos estos compuestos.



se encuentra además el enlace.



Por analogía, puramente formal con las acetonas orgánicas, cuya expresión general es

se denominan *silicon-acetonas* o, abreviadamente, *siliconas*.

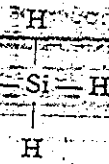
Nomenclatura de los compuestos organosilícicos

Por la importancia creciente que tienen las siliconas en sus aplicaciones actuales y futuras en Electrotecnia, nos ha parecido oportuno dar algunos conceptos sobre la nomenclatura de los compuestos organosilícicos que entran, más o menos directamente en la fabricación de las siliconas.

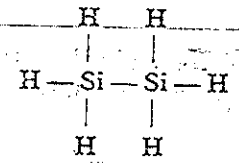
Los derivados hidrogenados del silicio se denominan *silanos* y son equivalentes a los hidrocarburos o compuestos hidrogenados del carbono.

Por ejemplo:

Monosilano o silano

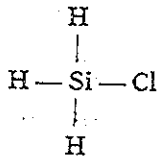


Disilano

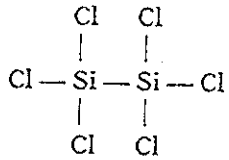


Los derivados halogenados del silicio, se denominan *halógenosilanos*. Por ejemplo:

Monoclorosilano

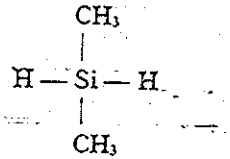


Hexaclorosilano

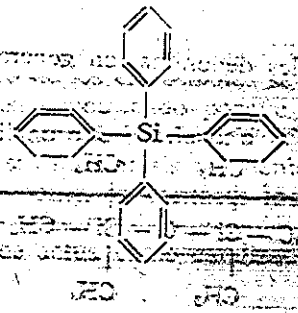


El átomo de silicio también puede estar enlazado o unido con radicales orgánicos. Por ejemplo:

Dimentilsilano

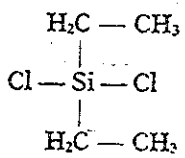


Tetrafenilsilano

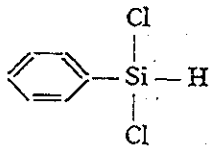


Y, también, simultáneamente, con radicales orgánicos y con halógenos. A continuación se citan unos ejemplos:

Dietildiclorosilano

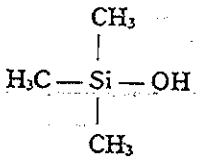


Fenildiclorosilano

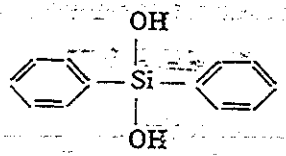


Los derivados organosilícicos que contienen un radical oxhidrilo (— OH) se denominan *silanoles*, como ejemplo:

Trimetilsilanol

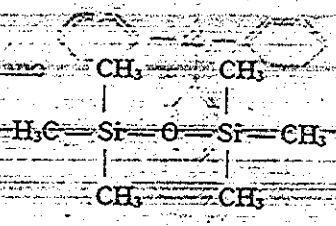


Difenilsilanodiol

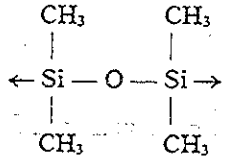


Cuando dos átomos de silicio están enlazados entre sí por un átomo de oxígeno, se obtiene los *siloxanos*. Pueden haber di, tri, tetra siloxanos, más allá, se les denomina, en general, *polisiloxanos*. Por ejemplo:

Hexametildisiloxano



Dimetilpolisiloxano



Las siliconas, que estamos estudiando son, generalmente, polisiloxanos.

Preparación de las siliconas

La preparación de las siliconas se realiza en dos fases:

a) síntesis de los compuestos monómeros del silicio que contienen carbono.
b) hidrólisis y polimerización de estos compuestos monómeros, para obtener los polisiloxanos.

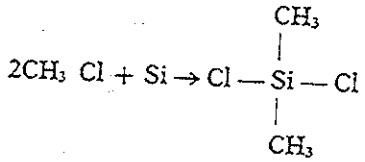
Entre todos los radicales orgánicos que es posible fijar sobre el átomo de silicio, el de más importancia industrial, con mucha diferencia, es el radical metilo (— CH_3), por lo que, en lo que sigue, se describirá preferentemente la obtención de estos compuestos aunque con la observación de que, cualquiera que sea el procedimiento empleado para la preparación de los compuestos iniciales, las operaciones finales de hidrólisis y de polimerización son análogas en todos los casos.

a) *Síntesis de los compuestos monómeros organosilícicos:* En la práctica, los monómeros más empleados para la obtención de las siliconas son los *clorosilanos*, que se han definido anteriormente.

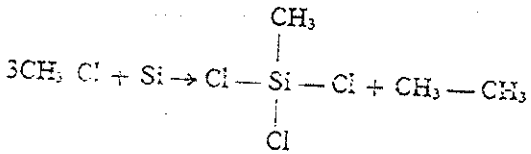
Para la preparación de los clorosilanos se utiliza el procedimiento de síntesis directa, así denominado porque permite transformar el silicio metal en un silano que contiene, a la vez, radicales orgánicos y átomos de halógenos: esta síntesis se efectúa en una sola operación.

En la práctica, se ponen en contacto los vapores de cloruro de metilo (CH_3-Cl) con silicio metálico en polvo, al que se añade cierta cantidad de cobre, que actúa como catalizador. La reacción se efectúa a unos 300° C.

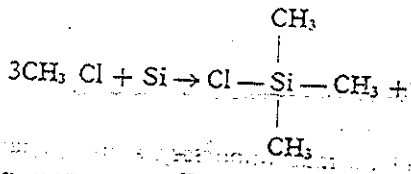
Las más importantes reacciones químicas que se producen, son las siguientes:



Dimetildiclorosilano



Metiltriclorosilano Etano



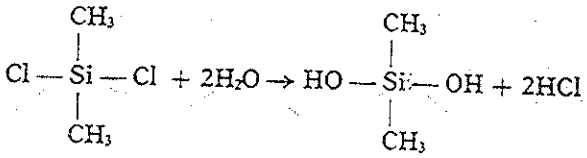
Trimetilclorosilano

Estas reacciones principales están acompañadas de gran número de reacciones secundarias. Por consiguiente, se obtiene una mezcla de los diferentes clorosilanos, acompañados de otros productos. Estos clorosilanos se condensan y, a continuación, se separan cuidadosamente por destilación. Esta última operación es muy delicada porque los productos a destilar tienen puntos de ebullición muy próximos.

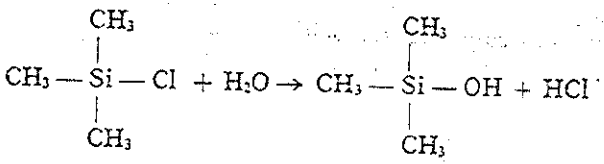
Por otra parte, aunque los clorosilanos no son corrosivos por sí mismos, la menor cantidad de humedad provoca la formación de ácido clorhídrico, cuya concentración puede resultar localmente elevada y, en estas condiciones, corroer todos los metales, incluso el acero inoxidable y el plomo. Por lo tanto, debe evitarse cualquier traza de humedad en las instalaciones. Finalmente, la pureza de los clorosilanos obtenidos debe ser superior a 99,9 %, para que las operaciones de polimerización conduzcan a productos bien definidos.

b) *Hidrólisis y polimerización de los clorosilanos.* La hidrólisis

de los clorosilanos conduce teóricamente, a la formación de silanoles por reemplazamiento de los átomos de cloro por grupos hidroxilos. Por ejemplo:

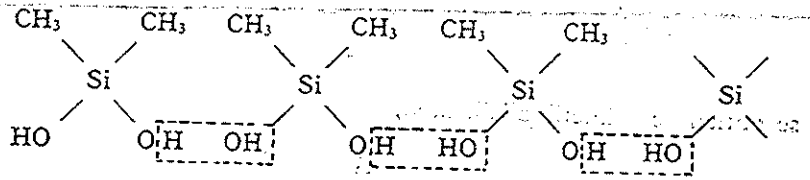


Dimetildiclorosilano Dimetilsilanodiol

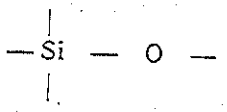


Trimetilclorosilano Trimetilsilanol

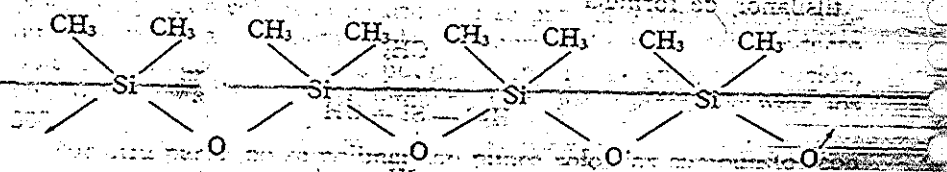
Pero estos silanoles no son estables y se condensan entre sí, con eliminación de agua, para dar los siloxanos. Por ejemplo, en el caso del dimetilsilanodiol, citado anteriormente:



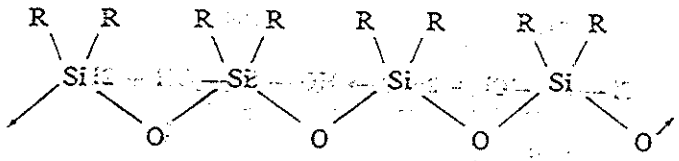
Y de esta forma se obtienen los enlaces



que caracterizan a las siliconas. Por ejemplo, en el caso anterior se obtendría el dimetilpolisiloxano cuya fórmula general es:

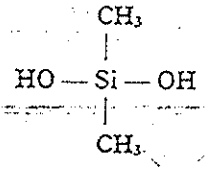


Es decir, que, si llamamos R a un radical orgánico cualquiera (metilo, fenilo, etc.), la fórmula general de los polisiloxanos es

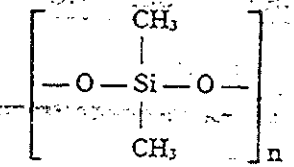


En la práctica no se intenta aislar los silanoles, por lo que la hidrólisis y la polinerización se efectúan en una sola operación. Para ello, se utilizan catalizadores ácidos o básicos y las temperaturas son muy variables según los productos: algunas reacciones se realizan a la temperatura ordinaria. Según los clorosilanos que se toman como punto de partida y, por lo tanto, según los silanoles obtenidos en la operación intermedia, se llegará a polisiloxanos diferentes.

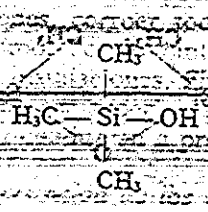
A partir del dimetilsilanodiol citado anteriormente y cuya fórmula es



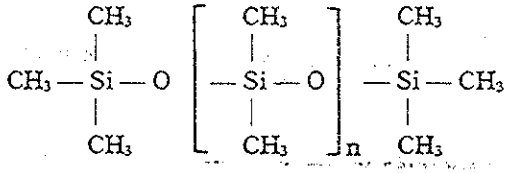
se obtiene el dimetilpolisiloxano,



con dos enlaces activos por monómero, lo que indica una cadena polimérica lineal. Para obtener una cadena polimérica de peso molecular bien determinado, se añade una pequeña cantidad de trimetilsilanol, de fórmula

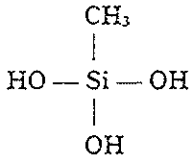


que se fija al principio y al fin de la cadena polimérica, parando de esta forma el crecimiento del polímero. Así, pues, la fórmula general de los dimetilpolisiloxanos sería

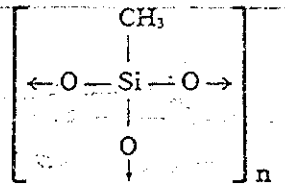


Como veremos más adelante, con los dimetilpolisiloxanos se obtienen muchos de los fluidos de silicona utilizados en Electrotecnia.

A partir del monómero metilsilanotriol, cuya fórmula es



se obtienen los metilpolisiloxanos, cuya fórmula general es



con tres enlaces activos por molécula, lo que quiere decir que el polímero correspondiente tendrá una estructura tridimensional. Esta estructura es, como se ha visto en un capítulo anterior, muy parecida a la de los materiales plásticos termoestables, lo que quiere decir que las siliconas obtenidas a partir de los metilpolisiloxanos serán resinas duras, muy resistentes al calor, y de propiedades físico-químicas parecidas a las de los plásticos termoestables.

En la práctica, para que los polímeros obtenidos sean utilizables (solubles y fusibles), es necesario que se pare la polimerización aunque no se haya completado; la polimerización final del producto obtenido se hace antes de su puesta en funcionamiento, por cocción, con o sin catalizador, y a temperaturas que pueden alcanzar los 300° C.

Por otra parte, no se polimerizan nunca solos los compuestos con

tres enlaces activos, ya que los productos obtenidos serían muy duros y prácticamente infusible. La mayoría de las veces, se emplean mezclas de componentes con uno, dos y tres enlaces activos, estructurados de forma que queden espaciados los enlaces transversales tridimensionales, introduciendo cadenas lineales para aumentar la flexibilidad y elasticidad de los compuestos obtenidos.

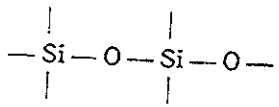
Propiedades generales de las siliconas

Las siliconas comerciales se presentan, esencialmente, bajo 5 formas diferentes que son:

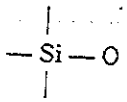
1. Fluidos o aceites
2. Compounds o pastas
3. Grasas
4. Resinas
5. Elastómeros.

Todos estos productos tienen en común cierto número de propiedades que se deben a su especial constitución química.

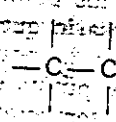
En una silicona, el esqueleto inorgánico, constituido por los enlaces.



aporta una gran estabilidad térmica y una gran inercia química. Efectivamente, la energía del enlace.



es 1,5 veces mayor que la del enlace.



y, además es particularmente resistente a la oxidación y a la hidrólisis.

Los radicales orgánicos fijados sobre el átomo de silicio confieren a las siliconas un aspecto comparable al de los productos orgánicos, con las ventajas derivadas de estos compuestos.

Estos radicales orgánicos son determinantes, sobre todo, de las especiales cualidades hidrófugas de las siliconas.

Por consiguiente, las principales cualidades generales de las siliconas, son las siguientes:

— Gran estabilidad térmica.

— Muy buena inercia química.

— Elevado poder hidrófugo.

— Incompatibilidad total con la mayoría de los disolventes orgánicos.

— Muy pequeña tensión superficial.

— Excelentes propiedades dieléctricas.

En lo que se refiere, más particularmente, a sus posibles aplicaciones electrotécnicas, todas las siliconas tienen las siguientes propiedades generales:

— Resistencia a variaciones de temperatura comprendidas entre − 50° C y + 250° C, en servicio continuo, sin que estas variaciones, aunque sean bruscas, afecten para nada en sus propiedades mecánicas y eléctricas.

— Excelente resistencia a las sobrecargas, a frecuencia industrial o media.

— Muy buenas propiedades dieléctricas. Son mejores que las correspondientes a los materiales aislantes orgánicos, sobre todo, en lo que se refiere a la estabilidad a la temperatura y a la humedad.

— Ausencia de envejecimiento a los agentes climatológicos, lo que permite su empleo en instalaciones exteriores sin protección.

— Resistencia al oxígeno, al ozono, y al efecto corona.

— Resistencia a los askareles, tipo Pyralene, hasta 150° C.

— Resistencia al agua, al vapor de agua y a la humedad.

— Resistencia a los agentes agresivos químicos (ácidos, álcalis, disolventes, etc.).

— Excelente flexibilidad en caliente y alargamiento suficiente para permitir la dilatación de los soportes.

A continuación, se desarrollan algunos conceptos relacionados con estas excepcionales cualidades de las siliconas.

Posiblemente la característica más remarcable de las siliconas es la estabilidad térmica. Como se ha dicho anteriormente, la mayor parte de estos compuestos pueden emplearse en el intervalo de temperaturas comprendido entre — 50° C y + 250° C. Su estado físico no varía prácticamente en este amplio intervalo de 300°. En ciertas siliconas especiales, este intervalo puede desplazarse aún más, de forma que se pueden conseguir temperaturas límites de — 100° C y de 300° C.

La inercia química de las siliconas es particularmente excepcional en lo que concierne a la oxidación y a la hidrólisis. Aun a elevada temperatura, los agentes químicos no tienen ninguna acción sobre ellas.

Es bien conocido su poder hidrófugo, es decir, que rechazan el agua, de forma que un material revestido con silicona no puede mojarse. Sobre todo, este poder hidrófugo resulta interesante porque no está afectado por la temperatura ni por las condiciones climatológicas.

La incompatibilidad de las siliconas con algunas materias orgánicas, es decir, el hecho de que no reaccionan entre sí y que no son miscibles, depende del grado de condensación de las siliconas. Es muy elevada para los fluidos, los compounds y las grasas y para la mayoría de resinas con polimeración total.

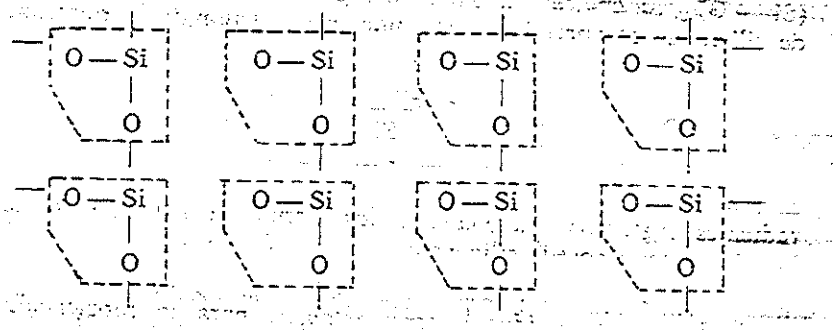
Finalmente, la industria eléctrica se aprovecha de sus excelentes propiedades dieléctricas que no están afectadas ni por el calor ni por la humedad y que se conservan incluso a altas frecuencias.

Diferentes tipos de siliconas utilizados

Las siliconas se diferencian entre sí por la cantidad de radicales orgánicos directamente ligados a los átomos de silicio; su estructura mineral está constituida por los encadenamientos o enlaces de átomos, directamente ligados a los mismos átomos de silicio.

La relación de las cantidades numéricas de grupos o radicales orgánicos o de átomos de oxígeno a las cantidades de átomos de silicio presentes en la molécula de silicona, permite prejuzgar las propiedades de ésta.

Por ejemplo, la sílice u óxido de silico está compuesta, esencialmente, por la siguiente red molecular:



Como puede apreciarse, se tiene una relación,

$$\frac{O}{Si} = 2$$

Cuantos más grupos orgánicos reemplacen a los átomos de oxígeno en la estructura anterior, tanto menos mineralizado estará el material correspondiente y, por consiguiente, más disminuirán la rigidez y la dureza, en beneficio de la blandura y de la flexibilidad. La naturaleza de estos grupos orgánicos puede variar según sean las propiedades particulares que se deseen obtener en el cuerpo resultante. Ya hemos visto que, por lo general los grupos orgánicos más numerosos en las siliconas son los radicales metilo ($-CH_3$), con lo que se mejoran extraordinariamente las cualidades hidrófugas, pero también pueden adicionarse otros radicales orgánicos distintos, para mejorar distintas propiedades que puedan resultar apropiadas y ventajosas para determinadas aplicaciones. A continuación se resumen estos grupos orgánic

— los radicales metilo, ($-CH_3$) que no absorben la humedad.
— los radicales fenilo, ($-C_6H_5$) resistentes a la temperatura y a sus variaciones.
— los radicales vinilo ($-CH=CH_2$) que facilitan los enlaces intramoleculares.
— los radicales fluorados ($-RFI$) que aportan la resistencia a los disolventes y a los aceites calientes.
— los radicales nitrilos ($-CN$) que aportan la resistencia a los fluidos fluorados calientes.

Llamando R al número de radicales orgánicos presentes y teniendo en cuenta que una silicona presenta siempre un enlace silicio-oxígeno (Si — O) y un enlace silicio-radical orgánico (Si — R) en cada átomo de silicio, se comprenderá enseguida que el valor de la relación

$$\frac{R}{Si}$$

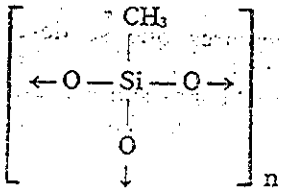
determina la naturaleza de la silicona. Según el tipo y cantidad de radicales orgánicos adicionados a los átomos de silicio, se obtienen los siguientes tipos de siliconas:

a) *Materiales rígidos y termoestables,* para la fabricación de aislantes duros (estratificados, polvos de moldeo rellenos de protección, etc.).

En este caso, se tiene

$$1 < \frac{R}{Si} < 1{,}3$$

Para estos productos se parte de los metilpolisiloxanos cuya fórmula general es

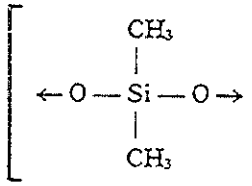


es decir, con enlaces triples, lo que proporciona una estructura tridimensional. El número n no puede ser muy elevado ya que entonces la silicona resultante sería muy dura y difícil de trabajar.

b) *Materiales elásticos y termoplásticos,* para permitir la dilatación de los soportes en los aislantes flexibles, tales como las cintas de relleno, los adhesivos, los materiales compuestos a base de mica, de amianto, de vidrio, etc. Ahora, se tiene la siguiente relación

$$1{,}2 < \frac{R}{Si} < 1{,}7$$

Por lo general, estos compuestos son mezclas de metilpolisiloxanos, citados en el párrafo anterior, y de los dimetilpolisiloxanos, cuya fórmula general es



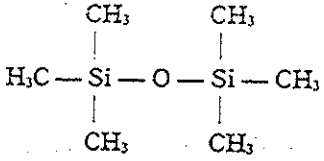
es decir, con enlaces dobles, lo que proporciona una cadena polimérica lineal.

Como se ha dicho en un parágrafo anterior (véase *Preparación de las siliconas*), estas cadenas lineales se introducen en el polímero para dar flexibilidad a la silicona resultante.

c) *Fluidos y aceites,* utilizados, sobre todo, como dieléctricos líquidos. En este caso, se tiene la siguiente relación.

$$1{,}8 < \frac{R}{Si} < 2{,}5$$

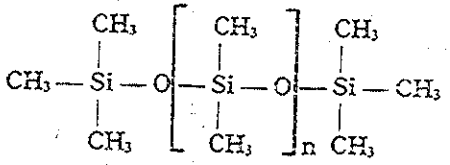
Se utilizan, sobre todo, los dimetilpolisiloxanos, citados anteriormente, la viscosidad de estos materiales depende de la longitud de la cadena polimérica. Por ejemplo, el más fluido de todos ellos es el dimetilhexasiloxano, cuya fórmula desarrollada es



que, como se puede apreciar tiene 6 grupos metilo y dos átomos de silicio es decir, que

$$\frac{R}{Si} = 3$$

Si en la fórmula general de los dimetilpolisiloxanos



La viscosidad de los distintos cuerpos que resultan de dar diferentes valores a n aumenta si n aumenta también. Para valores de

$$n = 1\,000$$

el material resultante tiene consistencia pastosa.

d) *Elastómeros o gomas,* utilizados en las formas más diversas tales como cintas autoadhesivas, recubrimiento de conductores eléctricos, etc., son altos polímeros lineales en los que se obtiene la siguiente relación.

$$1{,}99 < \frac{R}{Si} < 2{,}01$$

y no se diferencian de los aceites y fluidos, citados anteriormente, más que el número n de monómeros que, en este caso, puede llegar a valer.

$$n = 6\,000$$

Partiendo de los tres tipos de siliconas que hemos citado —resinas, fluidos y aceites, elastómeros— y añadiendo las cargas, catalizadores y otros agentes químicos, se obtienen otros productos silicónicos, los más interesantes para el electricista, son los siguientes:

a) *Compounds de silicona,* que están esencialmente constituidos por fluidos de silicona de viscosidad bastante elevada, adicionados con cargas inertes y de consistencia comparable a la de la vaselina.

b) *Grasas de silicona,* obtenidas por adición a los fluidos de silicona de materiales untuosos.

A continuación, se estudian las propiedades y campos de aplicación de los materiales citados en el presente parágrafo, teniendo en

cuenta que todos estos productos cumplen las propiedades generales especificadas en un parágrafo anterior y que nos referimos a las propiedades particulares de cada uno de los tipos de siliconas que se han citado.

Propiedades de las resinas de silicona

Las *resinas de silicona* son, generalmente, líquidos a la temperatura ambiente. Son termoestables y se polimerizan con o sin catalizador, a temperaturas comprendidas entre 150 y 300° C.

Las resinas polimerizadas pueden soportar temperaturas próximas a 250° C y, en algunas aplicaciones, su empleo puede alcanzar a temperaturas de 400 o de 500° C.

La resistencia a la humedad y a las intemperies es excelente y bajo la forma de películas, las resinas de silicona constituyen barnices de recubrimiento particularmente hidrófobos. Sus excelentes cualidades en lo que se refiere al contacto con el oxígeno del aire o del ozono, aseguran un envejecimiento casi nulo. Particularmente, si se emplean bajo la forma de barnices de protección o de impregnación, no tienen tendencia a endurecerse y la película depositada permanece flexible y sin resquebrajaduras.

Tienen excelentes propiedades dieléctricas y son comparables, a la temperatura ambiente, a los mejores barnices aislantes actualmente utilizados pero con la importante ventaja de conservar sus propiedades para todas las temperaturas de funcionamiento hasta unos 200° C.

La industrialización de estos materiales, y en lo que a sus aplicaciones electrotécnicas se refiere, ha conducido a sus fabricantes a distinguir diferentes categorías, en función de su utilización principal:

a) Resinas para fabricación de aislantes eléctricos flexibles.
b) Resinas para fabricación de aislantes eléctricos rígidos.
c) Barnices de impregnación y de protección.

Por otra parte, y dadas las buenas propiedades de antiadherencia y de inercia química de estos productos, es posible prever su empleo en bastantes otros dominios de aplicación.

Las limitaciones de las resinas de siliconas son las siguientes:

1. No deben someterse a temperaturas superiores a 180-220° C (Clase H), excepto en materiales especialmente fabricados para su funcionamiento a temperaturas superiores.

TABLA 60. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS RESINAS DE SILICONA

Características	Barniz aglomerante	Barniz de impregnación: Para alta temperatura	Barniz de impregnación: Para baja temperatura	Barniz de protección	Barniz de esmaltado	Resinas para productos estratificados: Baja presión (menos de 10 kg/cm²)	Resinas para productos estratificados: Alta presión (más de 10 kg/cm²)
Peso específico en gr/cm³	1,02	1,05	1,02	1,10	1,13	1,07	1,08
Pérdida de peso, en %	7	5	4	23	10	—	—
Resistencia al agrietamiento, en horas a 250 °C	3 000	1 000	750	—	—	—	—
Resistencia a la flexión, en horas a 250 °C	1 000	250	250	—	—	—	—
Resistencia a la flexión, en kg/cm² a 250 °C	—	—	—	—	—	2 600	2 600
Resistividad superficial, en ohmios/cm²	10^{14} a 10^{15}	10^{14} a 10^{15}	10^{14} a 10^{15}	10^{14} a 10^{15}	10^{14} a 10^{15}	10^{14} a 10^{15}	10^{14} a 10^{15}
Resistividad transversal, en ohmios/cm²	10^{13} a 10^{15}	10^{13} a 10^{15}	10^{13} a 10^{15}	10^{13} a 10^{15}	10^{13} a 10^{15}	10^{13} a 10^{15}	10^{13} a 10^{15}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	60 ... 80	40 ... 80	40 ... 80	60	80 ... 110	8 ... 10	11
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz a 25 °C	2,8	3,06	3	3,3	3,3	3,5	3,35
Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	2,8	2,98	2,9	3,3	3,3	3,44	3,31
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,0015	0,006	0,008	0,003	—	0,0012	0,0017
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	0,0014	0,007	0,005	0,010	—	0,0014	0,0019
Absorción de agua, en % en 24 horas	—	—	—	—	—	0,20	0,05
Resistencia al arco eléctrico, en seg.	—	—	—	—	—	120 a 300	120 a 300

2. No deben someterse a campos eléctricos constantes, superiores a 6 kV/mm.
3. No deben someterse a frecuencias superiores a 500 MHz.

Si no se sobrepasan los límites citados, permanecen constantes las propiedades físico-químicas, mecánicas y eléctricas que se enumeran en la tabla de la página anterior y en la que se expresan estas propiedades para diferentes materiales electrotécnicos a base de resinas de silicona.

Propiedades de los fluidos y aceites de silicona

A la temperatura ordinaria son líquidos incoloros, de viscosidad muy variable, ~~comprendida entre 0,65 y 1 000 000 centistokes.~~

Los fluidos de muy pequeña viscosidad son relativamente volátiles pero, a partir de los 50 centistokes, su volatilidad es muy pequeña y su punto de inflamación superior a 300° C. El punto de congelación aumenta también con la viscosidad pero, aun para los fluidos de muy alta viscosidad, permanece inferior a — 40° C.

Sus constantes físicas permanecen constantes en un amplio margen de temperaturas.

Una de sus características esenciales es que su viscosidad varía muy poco en función de la temperatura. Esta propiedad es muy interesante, por ejemplo, en caso de lubricación, ya que los fluidos de silicona no tienen tendencia a fluir, con el calor o, por el contrario, a solidificarse con el frío.

Los fluidos de silicona son hidrófobos.

Los fluidos de silicona presentan una excelente resistencia al cizallamiento. En los sistemas hidráulicos, aun a los sometidos a muy fuertes presiones, así como en los amortiguadores, su viscosidad no varía después de tiempos de funcionamiento muy largos.

Otra propiedad física muy interesante de los fluidos de silicona es su elevada compresibilidad bajo fuerte presión, en comparación con los compuestos orgánicos y los aceites minerales. Esta propiedad ha permitido la realización de resortes hidráulicos que, en un futuro próximo, reemplazarán a los resortes metálicos actualmente empleados, ya que permiten reducir unas 10 veces el peso y volumen de estos últimos. También son excelentes dieléctricos. Una variación de temperatura comprendida entre — 20° C y + 200° C no tiene prácticamente efecto sobre el factor de pérdidas dieléctricas; esta misma variación de temperatura apenas influye sobre la constante dieléctrica y la rigidez dieléctrica de los fluidos de silicona.

Estas características permiten clasificar los fluidos de silicona

entre los mejores fluidos dieléctricos a la temperatura ordinaria. Su superioridad es aún mayor cuando la temperatura aumenta.

Los fluidos de silicona son solubles en cierto número de disolventes orgánicos (particularmente, hidrocarburos y ésteres), pero son insolubles en los alcoholes inferiores y en el agua. Su inercia química es muy grande, sobre todo en lo que se refiere a la oxidación y a la hidrólisis. Por esta razón, los fluidos de silicona no corroen los metales ni atacan al caucho o a los materiales plásticos.

En presencia de aire, la oxidación comienza a hacerse sentir hacia los 200° C, es decir, a temperatura muy elevada. Los reactivos ácidos tienen escasa acción sobre los fluidos de silicona mientras que los álcalis fuertes concentrados los atacan lentamente.

De una forma general se puede decir que los fluidos de silicona empleados en Electrotecnia pueden utilizarse en un margen de temperaturas comprendido entre − 40° C y + 200° C.

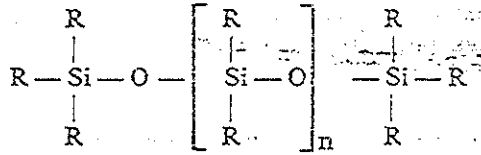
A continuación, se exponen en una tabla las más importantes características del fluido de silicona tipo DC 200 (Down Corning) y utilizado como líquido dieléctrico en condensadores, transformadores, disyuntores, etc.

TABLA 61. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS FLUIDOS DE SILICONA (TIPO DC 200 DE DOW-CORNING)

Peso específico, en gr/cm³	0,963 0,969
Punto de congelación, en °C	— 50 ... — 55
Punto de ebullición, en °C	200
Punto de inflamación, en °C	315 ... 337
Resistividad, en ohmios. cm²/cm	10^{11}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	10 ... 12
Constante dieléctrica ε, a 50 Hz	2,85
Constante dieléctrica ε, a 1 MHz	2,83
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,001
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	0,002

Propiedades de los elastómeros de silicona

Los elastómeros de silicona son macromoléculas lineales gigantes, cuya fórmula general es la siguiente:



Los elastómeros de silicona fabricados industrialmente tienen para n un valor próximo a 5 000, con un peso molecular comprendido entre 350 000 y 500 000. Tal como se ha indicado en un parágrafo anterior, generalmente se enlazan radicales metilo a los átomos de silicio; por lo tanto, los elastómeros de silicona son dimetilpolisiloxanos.

Después de la incorporación de cargas apropiadas (sílice en partículas muy finas) y de un catalizador de vulcanización (generalmente, peróxido de benzoilo), estos productos tienen, después de la operación de cocción, el aspecto y propiedades del caucho, por lo que se les denomina *elastómeros de silicona* y, otras veces, *cauchos de silicona*. Estos elastómeros tienen las siguientes propiedades.

1. Excelente estabilidad a las temperaturas extremas, con lo que sus propiedades físicas permanecen prácticamente constantes en el intervalo de temperaturas comprendido entre − 80° C y + 260° C.

Los elastómeros de siliconas permanecen utilizables después de largos períodos de exposición a cualquier temperatura comprendida en el intervalo citado anteriormente, mientras que todos los elastómeros orgánicos se endurecen y vuelven frágiles a bajas temperaturas o, por el contrario, se ablandan y carbonizan a temperaturas elevadas.

Una experiencia de comparación a baja temperatura entre un elastómero de silicona y un elastómero orgánico ha demostrado que algunas cualidades de los elastómeros de silicona no quedan afectadas de manera apreciable por temperaturas proximas a los 90° C, mientras tanto que el caucho natural como el sintético, se vuelven duros y quebradizos a 50° C.

Por otra parte, se ha comprobado que una exposición continua a temperaturas próximas a 180° C no tiene ningún efecto sobre los elastómeros de silicona y con una exposición intermitente a temperaturas próximas a 280° C no se producen serios desperfectos. Por el contrario, todos los elastómeros orgánicos, naturales o sintéticos, expuestos a 200° C durante 24 horas, se convierten en una masa pastosa inutilizable.

Los elastómeros de silicona se descomponen a 400° C dejando un residuo inerte, no inflamable y no combustible. Esta propiedad resulta muy interesante en aplicaciones electrotécnicas, ya que los cables aislados con elastómeros de silicona continúan en funcionamiento normal aunque el elastómero haya sido dañado por el fuego.

2. Resistencia perfecta a la oxidación, aun en presencia de ozono. Los elastómeros de silicona tienen excepcional resistencia a la oxidación y a los agentes atmosféricos. Su comportamiento es igualmente bueno en presencia de ozono.

3. Después de compresión permanente a temperaturas elevadas, los elastómeros de silicona recuperan sus propiedades elásticas. Esta propiedad permite la fabricación de juntas estancas que aseguran su funcionamiento a temperaturas superiores a 150° C; a estas temperaturas, los elastómeros orgánicos pierden su elasticidad y su resistencia mecánica.

4. Excelentes propiedades dieléctricas. Su estabilidad térmica y su resistencia a la oxidación confieren a los elastómeros de silicona unas propiedades dieléctricas particularmente interesantes para el aislamiento a altas temperaturas.

Efectivamente, las características dieléctricas de estos elastómeros, que son comparables a las de los materiales aislantes usuales a la temperatura ambiente, no quedan afectadas de forma sensible por la temperatura, como puede apreciarse en las figuras 85, 86 y 87, donde se muestra, respectivamente, la variación de la constante dieléctrica y del factor de pérdidas dieléctricas y de la rigidez dieléctrica

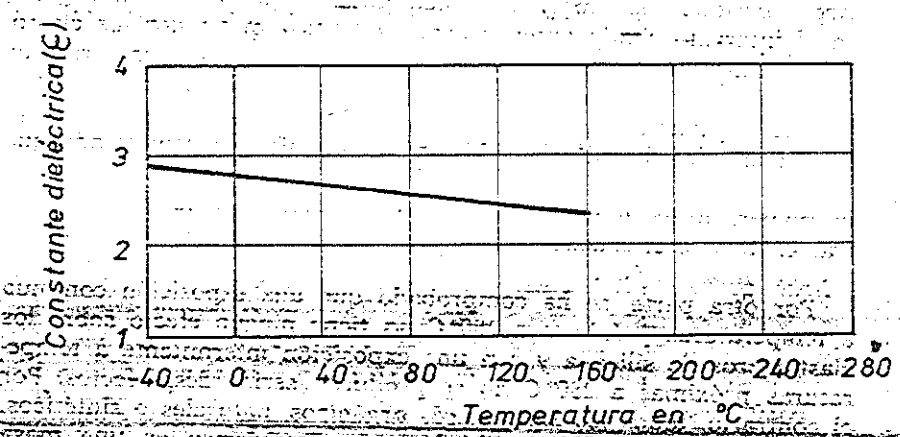


Fig. 85.—Variación de la constante dieléctrica ε, en función de la temperatura, en un elastómero de silicona.

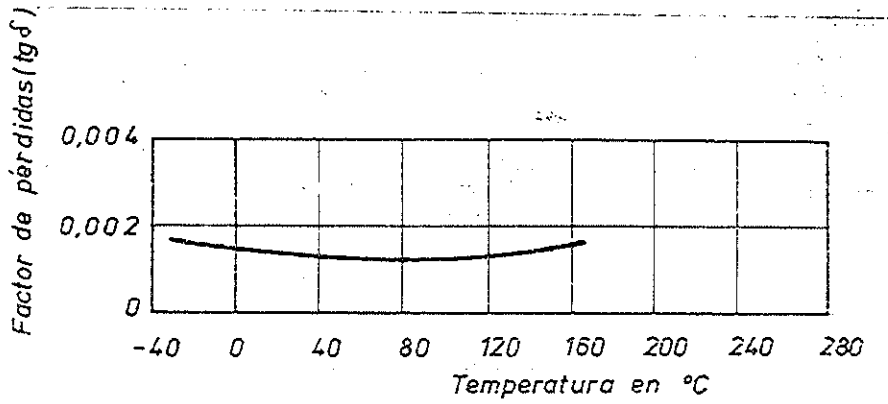


Fig. 86.—Variación del factor de pérdidas dieléctricas (tg δ), en función de la temperatura, en un elastómero de silicona.

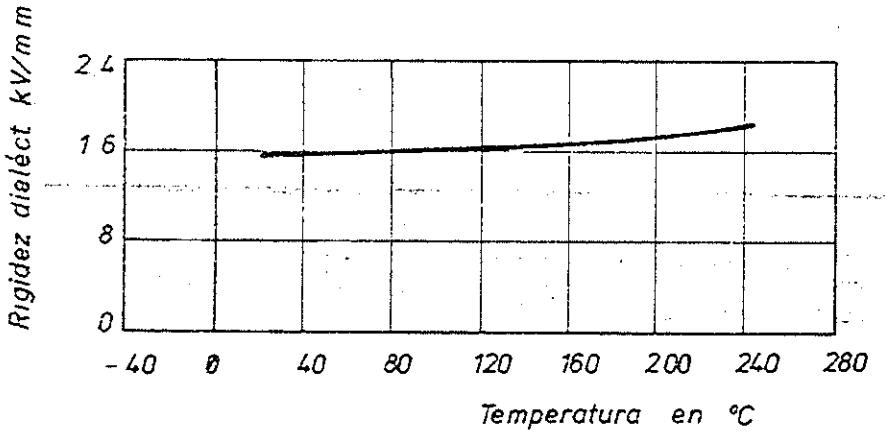


Fig. 87.—Variación de la rigidez dieléctrica, en función de la temperatura, en un elastómero de silicona.

en función de la temperatura. Después de una permanencia de 5 meses a la temperatura de 175° C la rigidez y la constante dieléctrica permanecen prácticamente constantes y sólo el factor de pérdidas dieléctricas aumenta ligeramente.

Por otra parte, se ha comprobado experimentalmente que la resistencia de aislamiento de un hilo aislado con elastómero de silicona es del orden de 3 000 megohmios por km a la temperatura ambiente y que, después de 200 días de inmersión en agua, a una

temperatura de 70° C todavía tiene una resistencia de aislamiento de 1 650 megohmios por km. También ha podido comprobarse prácticamente que los elastómeros de silicona tienen una excepcional resistencia al efecto corona.

5. Buena inercia química. Después de su completa cocción, los elastómeros de silicona solamente contienen el polímero organosilícico y cargas químicamente inertes (sílice), por lo que tienen buena resistencia a la acción de los agentes químicos, particularmente a los ácidos y a los álcalis diluidos. También es bueno su comportamiento al contacto con los aceites calientes.

Sin embargo, los disolventes orgánicos aromáticos y clorados provocan un importante aumento de volumen sin producir una dete-

TABLA 62. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ELASTOMEROS DE SILICONA

Características	Elastomero tipo				
	A	B	C	D	E
Color después de la cocción	Blanco	Blanco	Rojo	Blanco	Traslúcido
Peso específico, en gr/cm³, a 25 °C	1,2 ... 1,3	1,25	1,27	1,6	1,13 ... 1,17
Duración de la cocción a 250 °C, en horas	24	24	24	4 ... 8	4
Resistencia mínima a la tracción, en kg/cm²	52,3	42	56	35	45
Alargamiento mínimo, en %	250	150	250	160	500
Temperatura de fragilidad, en °C	< — 60	< — 60	— 62	— 68	< — 80
Deformación permanente a 150 °C, máx. en %	35	30	20	60 ± 10	—
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	22	22	18	20	24
Constante dieléctrica ε_r a 50 Hz	3,11	2,95	3,07	6,7	2,85
Constante dieléctrica ε_r a 1 MHz	3,07	2,92	3,13	6	2,85
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,0036	0,00095	0,006	0,007	0,0006
Factor de pérdidas (tg δ), a 1 MHz	0,002	0,0028	0,003	0,007	0,0003

rioración del elastómero de silicona. Efectivamente, después de la evaporación del disolvente, el elastómero recupera sus propiedades físicas y sus dimensiones originales.

6. Buenas propiedades mecánicas. Aunque estas propiedades sean todavía inferiores a las de los elastómeros, las nuevas calidades de elastómeros de silicona permiten obtener valores de resistencia a la tracción comprendidas entre 50 y 80 kg/cm², con alargamientos del orden de 500 %.

En la tabla 62, se expresan las características más interesantes de varios tipos comerciales de elastómeros de silicona.

Propiedades de los compounds de silicona

Los *compounds de silicona* están esencialmente constituidos por fluidos de silicona, de viscosidad elevada, a los que se adicionan cargas inertes. Tienen excelentes propiedades físicas y químicas, una consistencia comparable a la de la vaselina y pueden utilizarse en todos aquellos casos en que un aceite no daría buenos resultados.

La consistencia de los compounds varía poco en función de la temperatura y algunos de ellos pueden utilizarse desde — 40° C a + 200° C. Como tienen las propiedades hidrófobas de las demás siliconas, permiten realizar películas estancas a la humedad; los materiales protegidos resultan hidrófobos.

Los compounds pueden aplicarse sobre toda clase de materiales, ya que su inercia química es total. Particularmente, no tienen ninguna acción oxidante, ablandante o plastificante sobre los metales, materiales cerámicos, cauchos naturales o sintéticos, productos orgánicos, etc.

Tienen excelente resistencia a la oxidación, no se secan al aire y no se espesan bajo la acción de una temperatura elevada, aunque sea prolongada.

Utilizados como masa aislante de relleno, presentan muy interesantes propiedades dieléctricas, que se resumen a continuación:

Rigidez dieléctrica: 18 a 25 kV/mm
Constante dieléctrica a 1 000 Hz: 2,8
Factor de pérdidas dieléctricas a 1 000 Hz: 0,001
Resistencia al arco eléctrico: Excelente

Los compounds de silicona se dispersan muy fácilmente en numerosos disolvente, tales como la bencina, hidrocarburos aromáticos, disolventes clorados, etc. Las soluciones obtenidas son de fácil empleo y permiten el depósito protector de compound en capas muy finas sobre el material que deben proteger.

Los compounds son prácticamente ininflamables y bajo la acción del fuego se consumen muy lentamente dando cenizas blancas.

Propiedades de las grasas de silicona

Las *grasas de silicona* se obtienen añadiendo a los fluidos de silicona, cargas elegidas especialmente por su buena estabilidad. Están caracterizadas por las dos propiedades siguientes:

a) excepcional resistencia al calor, gracias a su pequeña volatilidad y a su muy elevada temperatura de descomposición.

b) muy pequeña variación de la consistencia en función de la temperatura, de lo que resulta que no tienen tendencia a fluir por acción del calor ni a endurecerse por acción del frío.

El resultado de la combinación de estas dos cualidades es que la zona de temperaturas en que puede utilizarse una grasa de silicona, es mucho más amplia que la correspondiente a las grasas minerales: por ejemplo, algunas grasas de silicona para rodamientos tienen temperaturas de empleo comprendidas entre −75° C y + 150° C, en otras, estas temperaturas están comprendidas entre − 30° C y + 300° C.

Como sucede con todas las siliconas, estas grasas son absolutamente insensibles al agua y tienen gran resistencia a la oxidación.

Se fabrican dos categorías distintas de grasas de silicona: las grasas para rodamientos y las grasas especiales para la lubricación de elementos que han de trabajar en condiciones especiales de temperatura: válvulas, compuertas, prensaestopas, etc., para la industria química.

Aplicaciones de las siliconas en Electrotecnia

Dadas las extraordinarias propiedades mecánicas, físico-químicas y dieléctricas de las siliconas, puede decirse que constituyen el material aislante por excelencia para el futuro. Y decimos para el futuro porque en la actualidad, y desgraciadamente, las siliconas son productos que aún resultan de difícil fabricación y a partir de costosas materias primas y, por consiguiente, resultan antieconómicas para aplicaciones generales, reservándose su empleo a los casos en que sus excepcionales propiedades se hacen indispensables, y el precio no resulta factor determinante. Se puede suponer que se irán abaratando los costes de fabricación y que su empleo se ha extendido cada vez más. Pero en la actualidad, su precio es de unas doce veces

más que los plásticos corrientes lo que, evidentemente, limita su campo de aplicación.

Cuando se realizaron las primeras investigaciones sobre las siliconas, se pudo comprobar que estos materiales poseían excelentes propiedades eléctricas, sobre todo, que podían trabajar a temperaturas próximas a 250° C sin modificar sensiblemente sus características. Esta constatación es muy importante cuando se trata de la construcción eléctrica donde el concepto de potencia útil está directamente relacionado con la noción de calentamiento admisible. Esta relación se traduce, en la práctica, por la clasificación del material eléctrico en función del calentamiento previsto por el constructor (aislantes clase Y, clase A, etc.).

Desde 1947, los aislantes de silicona o a base de silicona se homologaron como de clase H y, por lo tanto pueden emplearse en la construcción de aparatos en los que se haya previsto un calentamiento máximo de 180° C en servicio continuo.

Esta posibilidad es muy interesante ya que permite la investigación de materiales en los que se busquen estas características:

a) una considerable reducción de peso y de volumen para una potencia dada.

b) un aumento de la potencia sin modificación de la forma y sin aumento de peso ni de volumen.

c) una excelente resistencia para una temperatura ambiente elevada.

Sin embargo estas directrices de investigación no son las únicas interesantes, ya que a partir de las siliconas se pueden obtener también materiales aislantes particularmente eficaces contra la humedad o contra la acción destructora de atmósferas más o menos corrosivas.

Advertiremos también que las propiedades dieléctricas de los aislantes de silicona permiten, en muchos casos, una sensible disminución de los espesores a prever para un determinado valor de aislamiento. El conjunto de las características citadas anteriormente permite que, desde hace unos años, la construcción eléctrica haya recurrido ampliamente a las siliconas en los siguientes casos:

1. Aparamenta sometida a la acción de la humedad o de vapores corrosivos en las industrias químicas, de papel, y textiles, así como en electrometalurgia, en las destilerías y azucareras y en equipos eléctricos para fondo de las minas.
2. Aparamenta sometida a temperatura ambiente elevada en las industrias metalúrgicas, equipos para fondo de las minas, aviación, electrometalurgia y tracción eléctrica.

3. Aparamenta de peso y volumen reducidos, para aviación, tracción naval e industrias radioeléctricas y electrónicas.
4. Aparamenta sometida a un régimen de funcionamiento muy duro, para equipos de manutención mecánica, obras públicas, máquinas herramientas y equipos para fondo de las minas.

También se pueden emplear las siliconas para aplicaciones en las que los aislantes clases A y B pueden también utilizarse. Pero en este caso, la duración de vida del material de la clase H será muy superior a la prevista en los materiales de clases A y B. Se estima que, para condiciones de empleo comparables, la longevidad de los aislantes de silicona es unas 20 veces mayor que la de los aislantes clásicos.

El conjunto de materiales de silicona existentes (resinas, fluidos, elastómeros, compounds y grasas) permiten realizar todos los tipos de aislamiento utilizados normalmente en la industria eléctrica pero, mientras que la confección de aislantes clase H y la realización de productos de impregnación para bobinados y otras aplicaciones, han originado la aparición de tipos de barnices o de resinas especiales, algunas aplicaciones son posible con ayuda de siliconas clásicas; más adelante se citarán algunas de estas aplicaciones.

Las siliconas pueden emplearse en Electrotecnia de muy diversas formas, de las cuales solamente reseñaremos las más interesantes:

1. *Aislantes rígidos*, constituidos generalmente por resinas de silicona y que, a su vez, pueden subdividirse como sigue:

a) *estratificados vidrio-silicona y amianto-silicona*. Estos aislantes se emplean en clases F y H como soportes de arrollamientos y de conexiones, circuitos impresos, etc., que tengan que resistir temperaturas hasta 200° C, nieblas salinas, aceites y grasas. Resultan fácilmente mecanizables. Se fabrican para resistir bajas presiones (menos de 10 kg/cm²) altas presiones (más de 10 kg/cm²) y especiales para fieltros y tejidos de amianto.

b) *polvos de moldeo* para fabricar piezas moldeadas destinadas a diversas aplicaciones electrotécnicas (toma de corriente, racores, aisladores, etc.). Con estas piezas se puede trabajar en servicio continuo a 300° C; son incombustibles y pueden resistir temperaturas de más de 1 000° C durante 10 minutos, sin resquebrajarse ni aumentar de volumen. Son insensibles a la humedad.

c) *compounds*, utilizados para la obturación y cierre de elementos de porcelana y esteatita (por ejemplo, los aisladores pasatapa de los transformadores de potencia).

2. *Aislantes flexibles*, a base de resinas y de elastómeros de silicona; pueden presentarse de varias formas:

a) cintas, trenzas y tejidos de vidrio, recubiertos con resina de silicona. Se caracterizan por su flexibilidad y se emplean profusamente como aislamiento de hilos para bobinas inductoras, cabezas de bobinas, aislamiento de ranuras, etc.

b) cintas, trenzas y tejidos de vidrio, recubiertos con elastómero de silicona. Son más flexibles que las anteriores y tienen las mismas aplicaciones.

c) cintas autoadhesivas y cintas autofusibles, utilizados como aislantes de la clase H para aislamiento de acabado de bobinas, aislamiento de ranuras, etc.

3. *Aislantes clase H de mica y micanita*. Las placas aislantes a base de mica, se pueden aglomerar mediante una resina de silicona, con o sin adición de goma laca u otra resina orgánica, el material resultante puede utilizarse en aislantes para calefacción eléctrica y para aislamiento entre delgas de colectores. También pueden emplearse las resinas de silicona como agente aglomerante en las cintas de mica o de micanita utilizadas como aislamiento en los bobinados de barras de las máquinas eléctricas y transformadores.

4. *Barnices aislantes*. Fabricados a partir de las resinas de silicona y utilizados para impregnación de bobinados de motores, generadores y transformadores que han de funcionar en condiciones muy rigurosas de temperatura (hasta 180° C), de humedad (climas tropicales y de corrosiones diversas). En este grupo están comprendidos los siguientes tipos de barnices:

a) barnices de esmaltado para hilos de cobre.

b) barnices de impregnación para hilos de cobre cubiertos o trenzados con seda de vidrio.

c) barnices para impregnación final.

d) barnices adhesivos para encintados.

La mayor parte de estos productos se suministran en disolución con un disolvente adecuado y con una proporción de extracto seco y una viscosidad originales, adaptadas al empleo al que son destinados. La forma de empleo difiere muy poco respecto a la de los barnices aislantes usuales y puede resumirse de esta forma para los barnices de impregnación y de protección:

a) impregnación por inmersión, por pulverización o por tratamiento en vacío y bajo presión.
b) escurrido y secado al aire.
c) evaporación del disolvente en la estufa.
d) polimerización en la estufa.

El tiempo y la temperatura de polimerización puede variar según los diferentes tipos de barnices.

Los barnices de esmaltado o de impregnación para cubiertas textiles, se polimerizan a temperaturas elevadas (350° a 500° C) y en tiempos que varían entre 30 y 60 segundos. Por el contrario, los barnices de protección se polimerizan a temperaturas más bajas (150 a 250° C) pero con tiempos comprendidos entre 30 minutos y 12 horas.

La aplicación de estos barnices es posible en todos los campos de la construcción eléctrica:

a) Motores de corriente continua o alterna, con potencias comprendidas entre 0,25 CV y 150 CV, sean de nueva construcción, sean rebobinados.
b) Motores de corriente continua para tracción de 800 CV y más.
c) Generadores para grupos Diesel-eléctricos.
d) Generadores de aviones.
e) Transformadores para puestos de soldadura.
f) Transformadores de medida y de potencia, tipos seco.

En la construcción radioeléctrica, los barnices de silicona han encontrado también numerosas aplicaciones. Recordemos, por ejemplo, que los ensayos de tropicalización reproducen, en principio, las condiciones de utilización del material en los países de clima cálido y húmedo, en la mayoría de los casos, las normas de tropicalización imponen una permanencia, de menor o mayor duración a temperatura de 80 a 90° C y a 95 % de humedad relativa. Frecuentemente, los aparatos radioeléctricos tropicalizados están parcial o totalmente protegidos con barnices y compounds de silicona. Los revestimientos así obtenidos resisten perfectamente la humedad e impiden la formación de musgos y hongos.

5. *Aislamiento de conductores eléctricos.* Se emplean, sobre todo, los elastómeros de silicona, de las dos formas siguientes:

a) por extrusión.
b) por impregnación en tejido de vidrio.

Los primeros empleos de las siliconas en el aislamiento de conductores eléctricos, han sido consecuencia de los problemas militares, sobre todo en lo que se refiere a las siguientes exigencias de funcionamiento:

a) elevada resistencia de aislamiento en atmósfera muy húmeda.
b) elevación de las temperaturas de servicio por reducción de peso y de volumen.

De esta forma, los cables aislados con elastómeros de silicona han sido homologados en las Marinas de diversos países. En los buques de guerra equipados con este tipo de cables, y para el conjunto del cableado eléctrico de una unidad, se aprecia una reducción de peso de 20 %, y una economía de volumen de 30 %.

En la Aviación de varios países solamente los cables aislados con elastómeros de silicona permiten obtener las características exigidas a los conductores resistentes al fuego.

Las aplicaciones a la Aviación y a la Marina se extienden a toda la instalación eléctrica, es decir:

a) cables de encendido.
b) cables de conexión entre generadores y cuadros de distribución.
c) cables de distribución.
d) cables de alimentación de motores.
e) cables de alumbrados.
f) cables de telecomunicaciones.

En estas aplicaciones, y en lo que se refiere a los cables aislados con cintas de vidrio impregnados de elastómeros de silicona, se obtiene una temperatura de servicio de 125° C, para intensidades de 1 000 a 2 000 A y tensiones hasta 7 500 V. Para las fundas extruidas, la tensión puede alcanzar hasta 5 000 V, para intensidades de 500 A, con una temperatura de servicio que es también de 125° C.

En algunas ciudades americanas se están realizando interesantes experiencias: las redes subterráneas de distribución de estas ciudades han sido parcialmente reemplazadas por cables aislados con elastómeros de silicona, con lo que se ha conseguido aumentar la potencia sin tener necesidad de cambiar las canalizaciones de cemento para los cables.

Resumiendo, se puede decir que, aunque los cables aislados con elastómeros de silicona resultan más caros que los cables usuales, esta desventaja queda compensada en muchos casos, ya que evitan más frecuentes reemplazamientos y aseguran una inigualable seguridad de

servicio. Esta última ventaja resulta decisiva cuando los cables están instalados en lugares poco accesibles, húmedos o mal ventilados (orillas del mar, túneles, centrales hidráulicas, buques, aviones, etc.).

6. *Resinas de recubrimiento.* Se trata principalmente de resinas para el recubrimiento de chapas, núcleos y circuitos magnéticos de material de tracción, clase H, que pueden soportar hasta 250° C de forma continua, con puntas de 300° C.

Otras resinas de este tipo, se emplean como barnices de acabado de bobinados aprovechando sus propiedades antiadherentes frente al polvo y a la suciedad de los talleres.

También se utilizan elastómeros de silicona antivulcanizables, para el acabado de bobinados, como agente de encolado de circuitos impresos, para el recubrimiento de condensadores, etc.

Finalmente, se puede indicar que ciertas resinas de silicona permiten mejorar sensiblemente la resistencia a la temperatura y al agua de los cementos fenoplásticos utilizados para rellenar los casquillos de lámparas.

7. *Dieléctricos líquidos.* Los fluidos de silicona se emplean como dieléctricos líquidos, sobre todo en Electrónica. Como sus propiedades físicas y dieléctricas varían muy poco en función de la temperatura y de la frecuencia, el empleo de fluidos de silicona está indicado para el relleno de pequeños transformadores y de condensadores para equipos de radar o de radio, también se emplean estos fluidos en el relleno de magnetrones para emisión a muy alta frecuencia.

Una interesante aplicación de los fluidos de silicona está en los equipos de radio y de radar para navegación aérea. Como estos equipos pueden estar sometidos a considerables diferencias de temperatura (desde — 40° C a + 150° C), es indispensable elegir para el aislamiento de los componentes un fluido que posea características prácticamente constantes en este intervalo de temperaturas y que, además, tenga un pequeño coeficiente de dilatación y una buena conductividad calorífica. Los fluidos de silicona responden perfectamente a estas condiciones, con la ventaja adicional de que son totalmente inertes a los materiales utilizados en la construcción de estos aparatos.

La aplicación de los fluidos de silicona como dieléctricos líquidos en transformadores de potencia está actualmente limitada por el elevado precio de estos materiales en relación con los restantes dieléctricos líquidos y gaseosos, utilizados en estos transformadores (aceites, askareles, hexafluoruro de azufre, etc.).

8. *Productos de relleno.* También se emplean compounds, pastas y otros productos de relleno a base de siliconas, para juntas elásticas aislantes en los casos de fuertes elevaciones de temperatura (por ejemplo, en transformadores secos).

Estos compounds aislantes se utilizan también como insonorizadores y, muy particularmente, para el encolado de las porcelanas espaciadoras de barras, en los circuitos de alta tensión de los transformadores.

9. *Otras aplicaciones eléctricas de las siliconas.* El campo de aplicación de las siliconas se extiende cada día más, no solamente en la industria eléctrica sino también en la industria en general. Muchos problemas, no específicamente de aislamiento, planteados en la explotación de los sistemas eléctricos, se han resuelto mediante las siliconas de tipo corriente, no los productos de este tipo especialmente estudiados para su aplicación como aislante electrotécnico. No es posible dar a nuestros lectores reseña de todos estos problemas planteados, y resueltos gracias al empleo de las siliconas, por lo que nos limitaremos a dar algunos ejemplos que demuestran el amplísimo campo de aplicación de estos materiales:

a) Barnizado de aisladores de vidrio, porcelana, etc. Se intenta conseguir una superficie menos adherente, incombustible y, sobre todo, hidrófuga de tal forma que todos los agentes de contaminación (sal marina, polvos de carbón, silícicos y orgánicos) sean regularmente evacuados por la lluvia. Para ello se revisten los aisladores de una fina capa de fluido de silicona aplicado a pincel o, más modernamente, por pulverización.

En el estado actual de estas investigaciones se puede decir que las siliconas no resisten los arcos ocasionales pero, después de la destrucción, regeneran la superficie esmaltada de la porcelana: por lo tanto su acción es adicional. Allí donde los borosilicatos no resisten (vidrio), no puede pedirse a los compuestos organosilícicos (siliconas) una acción mejor. Sin embargo, se estudian nuevas dispersiones de elastómeros de silicona, con muy buenas propiedades adhesivas sobre las superficies vitrificadas y que se vulcanizan al aire, estos nuevos compuestos de silicona podrían dar buenos resultados, reemplazando a las pastas de silicona, hasta ahora utilizadas en las centrales y subestaciones situadas en las proximidades del mar y en las grandes regiones industriales.

b) Protección contra la humedad de piezas y cables aislados con resinas orgánicas o con materiales elastómeros (cauchos naturales y sintéticos), con la ayuda de compounds de silicona.

c) Mejora notable del comportamiento a la humedad de compuestos de tejido de vidrio-resina orgánica, por medio de barnizado con un barniz de silicona que se polimerice a temperatura relativamente baja.

d) Relés temporizados. Partiendo del hecho de que la viscosidad de un fluido de silicona varía en razón inversa de la temperatura, la firma *Heineman* aplica este principio a sus relés temporizados de nueva concepción. En estos relés un émbolo o núcleo móvil se desplaza en el interior de un tubo cerrado, de metal no magnético y relleno de silicona; en la parte exterior, este tubo lleva la bobina del relé. En la parte superior del tubo cerrado se desplaza el regulador de tiempo, que vuelve automáticamente a la posición "abierto" por la acción de un resorte. Cuando existe una sobre carga, la intensidad del flujo magnético de la bobina aumenta, atrayendo el núcleo hacia la armadura por el interior de la bobina. El fluido de silicona regula la velocidad de desplazamiento del núcleo ya que cuanto más es la temperatura más disminuye la viscosidad y tanto más rápidamente avanza el núcleo móvil por el interior del tubo. De esta forma, se consigue una temporización controlada cuya duración es inversamente proporcional a la elevación de temperatura, es decir, a la importancia de la sobrecarga.

Resumen final

Las siliconas constituyen, sin duda, unos materiales de enorme importancia futura para el electrotécnico. Dados los límites de la presente obra, solamente ha podido darse al lector una visión de conjunto de su amplio campo de aplicación. Téngase en cuenta además que una lista completa de las posibles aplicaciones de las siliconas no sería nunca limitativa, ya que los laboratorios de investigación continúan estudiando y poniendo a punto nuevas fórmulas. En función de las excepcionales propiedades de las siliconas, las aplicaciones conocidas actualmente son las más lógicas, las que derivan directamente de una o de varias de estas propiedades. Pero, sin duda de ninguna clase, quedan sin descubrir todavía numerosas e interesantes aplicaciones.

La continua evolución de las técnicas, y con mejor conocimiento de las propiedades de las siliconas por parte de los usuarios, aumentará, sin duda el campo de aplicación de estos materiales. El constante aumento del consumo de siliconas en todo el mundo durante estos últimos años permite suponer que, en un próximo futuro, estos materiales serán corrientemente utilizados en todas las ramas de la industria eléctrica.

13 Otros materiales aislantes sólidos

Generalidades

En el presente capítulo se estudian algunos materiales aislantes, sólidos a la temperatura ordinaria, que no han sido tratados en capítulos anteriores. La descripción de estos materiales no se hace según un criterio determinado, sino que se enumeran los más importantes de ellos, sin un orden especial.

Con este capítulo se cierra el estudio de los materiales aislantes sólidos más utilizados en Electrotecnia. Dada la inmensa variedad de estos materiales existente en el mercado, nos ha sido imposible, ni de lejos, describir todos ellos, ya que esta descripción hubiera dado al presente volumen una extensión desmesurada. Sin embargo, creemos que con los estudiados, puede tener el lector una idea muy aproximada de las características, empleo y límites de aplicación de los materiales aislantes sólidos más importantes utilizados en Electrotecnia.

Amianto y materiales derivados

El *amianto*, llamado también *asbesto* es el único material fibroso de origen mineral. Se compone, esencialmente, de sílice, magnesia y agua, a veces con óxido de hierro, arcilla y óxido de sodio. El color es, generalmente entre verde oscuro y verde negruzco aunque cuando la fibra se saca en hilos, es blanca y de lustre sedoso.

Este material resiste perfectamente temperaturas de 1 100 a 1 650° C y, algunas variedades, resisten temperaturas de hasta 2 760° C sin efectos apreciables. Es atacado por ciertos ácidos muy débiles (por ejemplo, el ácido acético), que disuelven las bases, dejando la sílice pura, sin destruir aparentemente la estructura fibrosa.

Las fibras naturales de amianto son finas y sedosas y su resistencia a la tracción es igual a la de la seda. Las fibras más largas y mejores se emplean preferentemente en la industria textil del amianto, mientras que las fibras cortas se emplean en cementos, pinturas y materiales moldeados. Debido a las superficies muy pulidas de las fibras de amianto, corrientemente se mezclan con fibras de algodón para facilitar el hilado, y, al propio tiempo, para aumentar la resistencia mecánica.

Excepto si está completamente seco, el amianto no es un buen aislante. Por otra parte, es muy higroscópico y puede estar impurificado con partículas conductoras de óxido de hierro. Por esta razón, muy frecuentemente, el amianto se presenta en combinaciones con otros materiales aislantes en los que éstos aportan las propiedades eléctricas, mientras que el amianto aporta su extraordinaria resistencia al calor. A continuación, se citan algunas de estas combinaciones.

Tela de amianto. El hilo de amianto puede tejerse en telas de distintos pesos y texturas que, por lo general, contienen del 15 al 20 % de algodón. Se tejen en forma espesa, constituyendo un material no poroso. Se emplea para la protección de devanados de motores de tracción y de otros aparatos eléctricos sometidos a elevadas temperaturas.

Cinta de amianto. Se teje con hilo de amianto de fibras largas en capa simple y orillado en ambos bordes. Se emplea para aislamiento de bobinas inductoras y de devanados de inducido de máquinas eléctricas; también se utiliza para aislamiento de barras colectoras y de conductores.

Papel de amianto. La fibra de amianto de grado o calidad especial para papel, se mezcla con gran cantidad de agua hasta que adquiera la consistencia pastosa y, transformada en pulpa, puede afelparse y secarse como en la fabricación del papel ordinario. Este material encuentra gran número de aplicaciones donde se requiere gran resistencia al calor: por ejemplo, para aislamiento entre bobinas constituidas por conductores envueltos con tiras, como recubrimiento de partes metálicas para evitar fugas a tierra y cortocircuitos y para pantallas de protección contra arcos eléctricos.

Fibrocemento. Este material aislante está constituido por cemento de fraguado lento, mezclado con un 10 % de fibra de amianto todo amasado y laminado. Puede ser aserrado y taladrado, aunque es más duro que la madera. Resiste los efectos de la intemperie y es completamente incombustible. Se emplea en la construcción de celdas de alta tensión, compartimientos de barras, barreras aislantes entre seccionadores, blindajes de seguridad, canales para cables, etc. Para el empleo de este material, ha de tenerse en cuenta que el cemento ataca lentamente los revestimientos protectores de plomo de las canalizaciones, cuando éstas van sobre cuadros, o en galerías; para evitar este inconveniente, al tiempo de hacer el mortero, se agrega una pequeña cantidad de sulfuro sódico.

Plancha de amianto impregnado. Material constituido por fibras de amianto y un cemento aglutinante, combinados a gran presión, e impregnado con un compuesto aislante bituminoso. En su aspecto, se parece a la ebonita o al ebano bien pulido, con acabado negro normal. No es atacado por el vapor, aceite, atmósfera salada, o cualquiera de los ácidos y bases comunes, ni por los cambios bruscos de temperatura. ~~La temperatura de trabajo es de 150° C y puede ser~~ estampado, taladrado y torneado con mucha precisión. Se utiliza en paneles para cuadros, soportes de barras colectoras, barras aislantes, cajas de fusibles, etc. Del mismo material se hacen también productos moldeados en frío.

Tela de amianto impregnada. Impregnando adecuadamente la tela de amianto con resinas sintéticas o con aceites aislantes, se mejoran las propiedades dieléctricas del producto obtenido, considerado de clase térmica B (Temperatura máxima de trabajo, 130° C). De esta forma pueden utilizarse estos productos como aislamiento de conductores para bobinados que deban trabajar en el margen de temperatura indicado.

Tela de vidrio-amianto. Se pueden combinar la gran resistencia mecánica y térmica del vidrio con la incombustibilidad del amianto mediante telas compuestas vidrio-amianto, ~~aglomeradas convenientemente mediante barnices de resinas sintéticas~~. Se obtiene de esta forma materiales aislantes de clase térmica F (temperatura máxima de trabajo, 155° C), que encuentran aplicación en el bobinado de electroimanes y su conexionado.

Estratificados de amianto. Son láminas superpuestas de tela o de papel de amianto, que actúa como soporte, impregnadas con resinas sintéticas, las cuales sirven de aglutinante entre cada estrato o

TABLA 63. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES AISLANTES A BASE DE AMIANTO

Características	Fibra de amianto sin impregnar	Fibrocemento	Placa de amianto impregnado	Tela de amianto impregnado	Estratificado de amianto, impregnado con resinas fenólicas	Estratificado de amianto impregnado con siliconas
Peso específico, en gr/cm³	2,2 ... 2,3	2,2	1,95 ... 2	2	1,5 ... 1,8	1,5 ... 1,8
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	4 000 ... 5 000	—	145	—	350 ... 700	—
Resistencia a la compresión, en kg/cm²	—	1 120	1 055	840	2 100 ... 2 700	500 ... 700
Resistencia a la flexión, en kg/cm²	—	420	—	350	700 ... 1 500	150 ... 250
Temperatura máxima de funcionamiento, en °C	1 000 ... 1 500	500 ... 1 200	150	130	150 ... 200	250
Absorción de agua en 24 horas, en %	—	10 ... 15	0,062	1 ... 2	1 ... 2	1,5 ... 3
Resistividad en ohmios, cm²/cm	—	—	10^{13}	—	—	10^{3} ... 10^{8}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	0,6 ... 3,2	Baja	2,2	1,9	1,9 ... 7,8	1,5
Constante dieléctrica ε	—	—	—	—	—	—
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	—	—	—	—	0,075	—

lámina. Pueden obtenerse placas, tubos, canales, barras y piezas moldeadas de diferentes formas.

Si el material empleado como aglomerante es una resina sintética (de melamina, de fenol-formaldehido, de poliester, etc.) el material obtenido es de clase térmica B (temperatura máxima de trabajo, 130° C) y este estratificado tiene aplicación como aislamiento de piezas expuestas a la humedad y a las fugas superficiales (climas tropicales, ambientes húmedos, etc.) Si el material empleado como aglutinante es un material cerámico, se obtienen materiales aislantes de clase térmica C (temperatura de trabajo superiores a 180° C) empleándose para pantallas apagachispas de interruptores, forrado de cámaras de disyuntores, etc.

En la tabla 63 se expresa como resumen de lo expuesto en este parágrafo las más interesantes características de algunos materiales aislantes a base de amianto.

Materiales aislantes bituminosos

Los *materiales bituminosos* son sustancias minerales inflamables, constituidas principalmente por hidrocarburos y que se caracterizan porque en frío son duras, pero no frágiles y tienen todas un punto de fusión inferior a 200° C; tienen escasa contracción al enfriarse, buenas propiedades aislantes y son químicamente estables. Todas estas sustancias son de color negro o muy oscuro, y no absorben la humedad.

Se emplean en la composición de las *pastas aislantes*, llamadas también *compounds aislantes* que se utilizan para rellenar huecos, espacios de aire y cavidades, con objeto de proteger contra la humedad y sustancias extrañas diversas partes de las máquinas e instalaciones eléctricas. La impregnación y la unión de todas las formas de materiales aislantes porosos, bobinados, capas aislantes de los hilos, etc., resultan esenciales para asegurar un aislamiento global satisfactorio, sobre todo cuando se trata de tensiones de servicio relativamente elevadas. También se aplican estas pastas aislantes para rellenar los manguitos de empalme, derivación, etc., de cables subterráneos, para aumentar sus cualidades aislantes, proteger estos cables contra los agentes exteriores anteriormente citados y dar al conjunto de la instalación una mayor capacidad y consistencia.

Los materiales bituminosos empleados en Electrotecnia son muy numerosos; de ellos, citaremos solamente los más interesantes:

Asfaltos naturales. Son cuerpos minerales, de consistencia viscosa, algunas veces sólida, que se encuentran en estado natural en

algunos países: Francia, Inglaterra, Austria, Palestina, Asia Menor y el Cáucaso. Químicamente son hidrocarburos no saturados; se hacen viscosos a 70° C y funden hacia los 100° C. Su peso específico está comprendido entre 1,04 y 1,40 gr/cm³. Todos ellos contienen azufre en mayor o menor proporción, y el contenido de agua puede llegar al 40 %. Son más o menos solubles en esencia de trementina, éter, alcohol y cloroformo. No son atacados por el agua, los ácidos ordinarios ni los álcalis. En lo que se refiere a sus propiedades dieléctricas, las más interesantes son:

Constante dieléctrica: 2,7
Rigidez dieléctrica: 1,2 a 4 kV/mm

No son frágiles y resultan impermeables a la humedad.

Los asfaltos se emplean en la fabricación de pastas aislantes, barnices aislantes negros, para cubiertas aislantes de cables como sustancia impregnante y como materiales de relleno.

Asfaltos de petróleo. Se obtienen como residuo de la destilación de petróleos asfálticos o de base mezclada. Tienen mayor pureza y uniformidad que los asfaltos naturales. También tienen propiedades elásticas por lo que, algunas veces, se les denomina *resinas minerales.* Su punto de fusión puede variar a voluntad hasta 150° C, mediante el soplado con aire y vapor, para oxidarlos parcialmente, aumentando de esta forma su punto de fusión. También pueden modificarse sus propiedades por adición de resinas naturales, para aumentar su fluidez a elevadas temperaturas sin que descienda su punto de fusión.

El peso específico varía entre 0,9 y 1,07 gr/cm³, según el estado de soplado. Sus características dieléctricas son:

Resistividad volumétrica: $6{,}1 \times 10^{14}$ ohmios. cm²/cm
Rigidez dieléctrica: 1 a 2 kV/mm
Factor de pérdidas a 50 Hz: 0,023

Tienen las mismas aplicaciones que los asfaltos naturales, descritos anteriormente.

Asfaltitas. Son sustancias naturales, muy semejantes al asfalto natural, pero mucho más duras; sus puntos de fusión están por encima de los 120° C. La más utilizada en Electrotecnia es la *gilsonita,* de color negro y lustre brillante, que funde a temperaturas comprendidas entre 130 y 190° C, tiene un peso específico de 1,10 gr/cm³ y una rigidez dieléctrica de 4 kV/mm. Se emplea en la fabricación de barnices y lacas aislantes.

Además de los materiales citados, también se emplean en Electrotecnia otros materiales bituminosos, que citamos brevemente:

a) *Betunes,* que son productos extraídos, por fusión o destilación, de los asfaltos naturales.
b) *Breas de petróleo,* muy parecidas a los asfaltos de petróleo, pero con menor contenido de azufre (0,1 a 0,4 %).
c) *Breas de hulla,* cuyo punto de fusión es más bajo que el de los asfaltos (90 a 100° C para los productos más duros), contienen mayor proporción de oxígeno y son muy poco solubles en los disolventes ordinarios.
d) *Breas de lignito,* procedentes de la destilación de los lignitos.
e) *Breas esteáricas,* residuos de la destilación de ácidos grasos y que contienen elevada proporción de materias saponificables, a las que deben su flexibilidad.

Ceras aislantes

Con el nombre general de ceras, se designan ciertos compuestos de carbono, constituidos principalmente por esteres de los ácidos grasos. Tienen consistencia blanda o pastosa, brillo característico y [illegible] más elevados que los de las materias bituminosas [illegible] son impermeables y resultan impermeables [illegible] a la humedad. Mediante el calentamiento prolongado de las ceras a altas temperaturas en contacto con el aire, se favorece su descomposición y el desarrollo de acidez, particularmente en presencia del cobre, el cual actúa como agente catalizador, aumentando marcadamente la oxidación.

Desde el punto de vista eléctrico, las ceras están caracterizadas por una resistividad muy elevada y un factor de pérdidas dieléctricas [illegible] la constante dieléctrica es relativamente baja en comparación con otros materiales aislantes.

[illegible] resinas naturales o sintéticas de [illegible] punto de fusión.

Al ser fundidas, las ceras constituyen buenos materiales de impregnación, siendo totalmente impermeables aunque, por lo general, no son resistentes al aceite.

Su alta resistividad y pequeña falta de pérdidas hace estos materiales muy adecuados para recubrir papel destinado a la fabricación de condensadores y al aislamiento de bobinas, que de esta forma queda impermeabilizado contra la humedad (*papel parafinado*).

Un inconveniente para su empleo es que se contraen mucho entre

su temperatura de fusión y la de solidificación por lo que, la sección transversal es grande, pueden aparecer grietas o cavidades; esto ha provocado la aparición de ceras sintéticas, con puntos de fusión de hasta 140° C.

A continuación, intentaremos clasificar y exponer las características de las ceras más utilizadas en Electrotecnia.

1. *Ceras de origen animal.* La más importante es la *cera de abejas*, sustancia segregada por estos insectos para la construcción de las celdas de sus panales. Es un sólido amarillo opaco, de olor agradable y que se hace plástico al ser calentado. Funde entre 62 y 64° C. La luz solar la blanquea y se vuelve parda por la acción del tiempo. Tiene elevada resistividad de volumen y buenas propiedades aislantes. Se emplea en la fabricación de barnices plásticos y compuestos empleados en la impregnación de conductores para bobinados aislados con algodón o con seda.

2. *Ceras de origen vegetal.* Las más importantes, son las siguientes:

a) *Cera de Carnauba*, extraída de las hojas de una palmera de América del Sur. La cera bruta se obtiene tratando estas hojas con agua hirviendo. Tiene un color verdoso y funde de 83 a 85° C.

b) *Cera del Japón*, extraída de la pulpa y de los granos de un árbol aclimatado en China y Japón. La cera se extrae por tratamiento al vapor y a presión. El punto de fusión varía entre 42 y 50° C.

3. *Ceras de origen mineral.* Desde el punto de vista electrotécnico, son las más interesantes; entre ellas, se pueden citar:

a) *Ozoquerita.* Es una cera natural, amorfa, de color negro o pardo oscuro; cuando se blanquea es de color blanco amarillento a pardo. Funden entre 70 y 80° C. No se descompone ni se altera ni aun a temperaturas que pasen de 120° C. Es muy plástica y resiste, sin resquebrajarse, los cambios bruscos de temperatura. Tiene elevada resistividad, varias veces superior a la de la parafina.

b) *Ceresina.* Se obtiene por purificación o refinación de la ozoquerita, citada anteriormente. Funde entre 65 y 70° C, es soluble en aceites y petróleos destilados y tiene extraordinarias propiedades dieléctricas. Se emplea, sola o mezclada con otras ceras, como constituyente de diversos compuestos aislantes.

c) *Cera Montan.* Se obtiene disolviendo ciertos betunes no asfálticos por medio de disolventes volátiles. La cera cruda es de color pardo pero el producto obtenido por destilación en el vacío es casi blanco. Su punto de fusión está entre 77 y 93° C. Esta cera es cristalizable y, por lo tanto, propensa a agrietarse y dejar penetrar la humedad por capilaridad por lo que, generalmente, se mezcla con una cera amorfa o con una resina con lo que se reduce este inconveniente. Se emplea frecuentemente en la fabricación de materiales aislantes.

d) *Cera negra.* Llamada también pez, es una mezcla aislante, constituida por asfalto, resina y cera, todo ello fundido simultáneamente. Se emplea, sobre todo, como material de relleno y para taponamiento de agujeros y cavidades.

e) *Parafina.* Es una mezcla compleja de hidrocarburos, obtenida por destilación de madera, hulla y aceite. Es incolora o blanca, químicamente inerte y no es afectada ni por los reactivos más potentes. Es insoluble en el agua y en los ácidos, pero soluble en alcohol y en los aceites. Funde entre 40° C *(parafina blanda)* y 62° C *(parafina dura)* y tiene estructura cristalina. Es inflamable. Tiene extraordinarias cualidades dieléctricas: muy elevada resistividad de volumen y factor de pérdidas muy reducido. Resulta impermeable al agua.

La parafina es uno de los mejores aislantes conocidos para aplicaciones a frecuencia industrial. Entre sus aplicaciones, cabe destacar:

1) Impregnación de materiales celulósicos y textiles, tales como papel, madera, etc., para impermeabilizarlos.
2) Aislamiento de condensadores, bobinas de inducción, pequeñas baterías, etc.
3) Protección de las resistencias calibradas de las cajas de medidas y de los instrumentos de medida de laboratorio.
4) En los pequeños transformadores de alta tensión, los devanados se sumergen en parafina, quedando de esta forma perfectamente protegidos contra la humedad.

4. *Ceras sintéticas.* El principal inconveniente de las ceras naturales es su bajo punto de fusión. Esta circunstancia ha llevado a diversos fabricantes a investigar sustancias obtenidas sintéticamente, que tuvieran iguales o parecidas propiedades eléctricas que las ceras naturales, sin el inconveniente apuntado anteriormente. De esta forma, se han obtenido ceras sintéticas con puntos de fusión de hasta 140° C, aunque en el estado actual de la técnica, no ha sido posible encontrar ningún producto sintético, con las excepcionales cualidades dieléctricas de las ceras naturales; es decir, que las ceras sintéticas tienen menor resistividad y mayor factor de pérdidas dieléctricas que las ceras naturales.

Como ejemplo de estos materiales, citaremos las *ceras Halowax*

fabricadas por la firma americana HALOWAX CORP. a partir del cloruro de naftaleno; estos materiales sintéticos se hacen de características muy variadas, según la aplicación que se pretenda darles. Por ejemplo, el denominado *Halowax 1001* es especialmente apropiado para aislamiento de condensadores, debido a su elevada constante dieléctrica, mientras que los *Halowax 1013* y *1014* se emplean como impregnantes de conductores eléctricos.

Las ceras sintéticas tienen gran resistencia a la humedad y son prácticamente incombustibles. Pueden mezclarse con otras ceras y resinas y se emplean de forma general para dar plasticidad a los materiales plásticos.

Como resumen del presente parágrafo, en la tabla 42 se exponen las más interesantes características de las más importantes ceras empleadas en Electrotecnia.

Resinas naturales

Las *resinas naturales* son productos fósiles de formación reciente, de origen animal o vegetal, que son sólidos a la temperatura ordinaria aunque de punto de fusión muy bajo. Por acción de diversos disolventes, se convierten en líquidos de consistencia viscosa; en este estado se emplean, por sus buenas propiedades eléctrica, para impregnación de otras sustancias aislantes y en la fabricación de barnices aislantes.

Para dar a las resinas naturales una mayor resistencia a los agentes atmosféricos, generalmente se combinan con glicerina. Estos productos se denominan *resinas eterificadas* o, también, *resinas naturales modificadas*.

A continuación se expresan las propiedades y características de las resinas naturales más empleadas en aplicaciones electrotécnicas.

Ambar. Es una resina fósil, dura, frágil, casi transparente, de color amarillo claro a rojo, se encuentra en las orillas del mar Báltico, en Asia Menor y en Birmania.

Cuando se le quiere emplear con fines electrotécnicos, se pulveriza, se trata con ácido clorhídrico, se lava y se seca. Luego se da a este polvo la forma deseada, a base de presión y de altas temperaturas. Con herramientas adecuadas, se puede trabajar y pulir bien su superficie.

A continuación se citan las más interesantes características técnicas de este material:

Peso específico: 1,05 gr/cm³
Punto de fusión: 250 a 325° C
Absorción de agua: baja
Resistividad volumétrica: 10^{16} ohmios cm²/cm
Rigidez dieléctrica: 55 kV/mm
Constante dieléctrica: 5 a 6
Factor de pérdidas: 0,005

A pesar de tan excelentes cualidades dieléctricas, el ambar es poco empleado, debido a su precio, excesivamente caro, por lo que ha sido sustituido, casi en todas sus aplicaciones, por otras resinas naturales o sintéticas, más económicas. Mezclado con ceras y resinas, se utiliza para la fabricación de barnices aislantes.

Colofonia. Es una resina amarilla, sólida, transparente, residuo de la destilación de la esencia de trementina, que se obtiene de las coníferas (pino, abeto, etc.). Se presenta en forma de masa resinosa, amarillenta o parda clara. Es insoluble en el agua, pero se disuelve rápidamente en alcohol y en éter. Para aplicaciones aislantes, se destila la resina en el vacío.

Se emplea en la fabricación de barnices aislantes y, mezclada con aceites minerales, como masa de impregnación de conductores eléctricos.

Copal. Bajo este nombre, se incluye un grupo de resinas que proceden de la exudación de varias especies de árboles. Los copales comerciales son, casi siempre, resinas fosilizadas, recogidas en los terrenos pantanosos y en los ríos. Estas resinas se presentan en forma de bloques, más o menos compactos. El número de variedades de copal es muy elevado y sus propiedades muy diferentes; se pueden incluir en tres grandes grupos:

a) *Copal duro* (Zanzíbar, Madagascar)
b) *Copal semiduro* (Angola rojo, Kauri, Borneo)
c) *Copal blando* (Camerún, Brasil)

Los componentes químicos del copal son ácidos orgánicos complejos, éteres, alcoholes, etc., que resulta difícil definir, aislar y estudiar.

En Electrotecnia se emplean diversas variedades de copal para la fabricación de barnices aislantes; en todos los casos, antes de su

empleo, debe someterse al copal a diferentes ensayos para determinar sus características físicas, químicas y dieléctricas.

Goma laca. Esta resina es de origen animal y se produce en el cuerpo de un insecto parecido a la cochinilla, que chupa la savia del árbol de la goma laca, en las Indias Orientales.

La *goma laca cruda* tiene la siguiente composición:

Resina	75 a 85 %
Colorante	2 a 4 %
Cenizas	1 a 2 %
Agua	2 a 3 %
Impurezas	9 a 15 %

La goma laca cruda es lavada, secada y prensada bajo la acción del calor; después de enfriada se obtiene la *goma laca refinada*, cuya cuya composición es la siguiente:

Resina	90 %
Cera	3 a 5 %
Agua	1 a 2 %
Impurezas	1 a 5 %

La goma laca se disuelve en alcoholes y acetonas y las soluciones se emplean como barnices aislantes. Pierde solubilidad cuando se la somete al calor durante cierto tiempo.

La goma laca se emplea también para compuestos moldeables en caliente y como aglomerante, previamente disuelto en alcohol, para materiales a base de papel, miça, etc.

También se pueden mezclar con la goma laca varios rellenos minerales, tales como amianto, mica en polvo, arcilla, mármol y harina de madera, por un procedimiento análogo al utilizado en la fabricación de los componentes de caucho; el material sale de los laminadores en forma de láminas y después de blanqueado, se corta en las dimensiones convenientes.

Con calentamiento prolongado a más de 100° C, se solidifica la goma laca fundida y forma una masa compacta y dura; es decir que, en estas condiciones, la goma laca tiene características termoestables. Esta acción se acelera por aumento de calor y adición de ciertos agentes químicos y el material resultante tiene mejores propiedades mecánicas, más elevada temperatura de servicio continuo y menor factor de pérdidas dieléctricas.

Aunque su empleo ha sido sustituido en gran parte por las resinas

sintéticas, la goma laca es todavía uno de los materiales aislantes de mayor aplicación en Electrotecnia, sobre todo en baja tensión.

A continuación, se exponen en una tabla las más interesantes características técnicas de la goma laca.

TABLA 65. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA GOMA LACA

Peso específico en gr/cm³	1,009
Punto de fusión, en °C	45 ... 75
Absorción de agua en 24 horas, en %	< 0,25
Resistividad en ohmios. cm²/cm	10^{15} ... 10^{16}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	35
Constante dieléctrica ε	3 ... 3,7
Factor de pérdidas (tg δ) a 50 Hz	0,0061

Pizarra

La *pizarra* es un silicato aluminico impuro, cuya constitución aproximada es: 55 a 67 % de sílice, 11 a 23 % de alúmina y vestigios de óxidos de hierro y sales metálicas diversas. Es de estructura laminar y se hiende con facilidad. Es frágil. Cuando se extrae de las canteras, es muy húmeda, para emplearla en aplicaciones eléctricas debe estacionarse y secarse durante bastante tiempo; en estas condiciones, no reabsorbe humedad en cantidad apreciable. La pizarra empleada en Electrotecnia debe estar exenta de venas metálicas, para lo que deben realizarse los ensayos previos correspondientes.

La pizarra electrotécnica se emplea para soporte de conductores activos y paneles de distribución hasta tensiones de servicio de 500 V.

Para aumentar las propiedades dieléctricas de la pizarra, ésta puede impregnarse con aceite de linaza o con parafina. Para ello, antes de su impregnación, se seca en una estufa y con vacío durante 20 a 25 días, a una temperatura de 110° C, que debe alcanzarse poco a poco. Al salir de la estufa, los trozos de pizarra se sumergen rápidamente en un baño de aceite de linaza o de parafina, donde permanecen, a temperatura constante, durante cuatro o cinco días. Se interrumpe el caldeo del baño y, una vez enfriado, se saca la pizarra que, después de escurrida, se seca en una cámara durante cinco días

a una temperatura de 110° C. Antes de su utilización, y para mejorar su aspecto y sus propiedades eléctricas, se da a la parte frontal una capa de goma laca.

También puede impregnarse con barniz de baquelita, aunque el proceso resulta relativamente costoso.

La pizarra tiene buenas propiedades mecánicas y de resistencia al fuego. Actualmente ha sido parcialmente sustituida en sus aplicaciones por otros materiales, tales como la plancha de amianto impregnada y otros productos moldeados.

A continuación, se expresan en una tabla las más interesantes características de la pizarra electrotécnica.

TABLA 66. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PIZARRA

Peso específico, en gr/cm³	2,6 ... 3,3
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	255 ... 500
Resistencia a la compresión, en kg/cm²	700 ... 900
Temperatura máxima de funcionamiento, en °C	120 ... 200
Absorción de agua en 24 horas, en %	0,2
Resistividad en ohmios. cm²/cm	10^8
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	0,2 ... 0,4
Constante dieléctrica ε	6 ... 7,5
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,086

Mármol

El *mármol* es una piedra caliza cristalina, constituida por óxido de calcio y carbonatos de magnesio; frecuentemente contiene también agua y, algunas veces, vetas metálicas. Es un material compacto y duro aunque frágil. Aunque resiste bien las acciones caloríficas de corta duración, se vuelve quebradizo si éstas son permanentes. El mármol es más o menos higroscópico, según la variedad; por esta razón, en las instalaciones subterráneas solamente puede emplearse sumergido en aceite.

A partir de los bloques de mármol, se preparan placas de 20 a 30 mm de espesor, con cintas de acero móviles ayudadas por arena

de cuarzo. Estas placas pueden trabajarse bien con las herramientas normales (taladrado, aserrado, etc.).

Su agradable aspecto y buenas propiedades mecánicas y dieléctricas, le hacen un material muy adecuado para paneles de distribución de baja tensión pero a causa de su precio, relativamente caro, se tiende a sustituirlo por otros materiales más económicos y de propiedades semejantes, aunque no de tan buen aspecto.

Las placas de mármol para cuadros de maniobra y distribución, se pulen por la cara anterior y se barnizan con laca aceitosa por la parte posterior, procurando que ésta penetre bien en los taladros. Los pernos de los tornillos, se pegan al mármol con cemento de yeso, o con una pasta constituida por glicerina y litargirio.

A continuación, y en una tabla, se indican los valores promedios de las características del mármol blanco, que es el más empleado en electrotecnia.

TABLA 67. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MÁRMOL

Peso específico en gr/cm³	2,6 ... 2,8
Resistencia a la tracción, en kg/cm²	—
Resistencia a la compresión en kg/cm²	600 ... 1 400
Temperatura máxima de funcionamiento, en °C	800 ... 900
Absorción de agua en 24 horas, en %	0,26
Resistividad en ohmios. cm²/cm	10^{10}
Rigidez dieléctrica, en kV/mm	2 ... 4
Constante dieléctrica ε	8,3 ... 9,3
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz	0,039

14 Materiales aislantes líquidos

Conceptos generales

Antes de entrar propiamente en materia, resulta conveniente hacer una distinción entre *materiales aislantes polares* y *materiales aislantes no polares*. Aunque estos conceptos pueden aplicarse, en general, a todos los materiales aislantes, es en los aislantes líquidos donde tienen mayor importancia, por lo que hemos creído oportuno incluirlos en el presente capítulo.

Un *material aislante polar* está caracterizado por un desequilibrio permanente de las cargas eléctricas dentro de cada molécula. En Electrotecnia, este sistema de cargas desequilibrada se denomina *dipolo* y tiende a girar en un campo eléctrico. En los líquidos aislantes polares hay rotación libre de los dipolos a ciertas temperaturas y frecuencias, lo que provoca unas pérdidas dieléctricas muy elevadas a dichas temperaturas y frecuencias.

En un *material aislante no polar*, no existe desequilibrio permanente de carga; puesto que la molécula no puede ser distorsionada por la aplicación de un campo eléctrico, no existe tendencia al giro. Por consiguiente, los materiales no polares están exentos de variación brusca de las pérdidas dieléctricas por variación de la temperatura o de la frecuencia, y cualquier variación de la constante dieléctrica o del factor de potencia, se produce gradualmente.

Por su estructura química, se puede predecir si un material es polar o no polar. La mayoría de los hidrocarburos son no polares y, por consiguiente, los hidrocarburos líquidos y sus derivados serán los mejores aislantes líquidos, es decir, los que conservarán de forma permanente sus propiedades dieléctricas a cualquier temperatura y frecuencia.

Entre los materiales aislantes líquidos polares pueden encontrarse algunos de excepcionales propiedades dieléctricas a temperatura y frecuencia determinadas, pero no tienen una zona de funcionamiento tan amplia como los anteriores pues, como hemos dicho, las pérdidas dieléctricas varían extraordinariamente con la temperatura y con la frecuencia.

Desde el punto de vista electrotécnico, son más interesantes los aislantes líquidos no polares y a ellos haremos referencia, mientras no se diga expresamente lo contrario.

Propiedades eléctricas de los materiales aislantes líquidos

Conductividad eléctrica. La *conductividad eléctrica* en corriente continua de los dieléctricos líquidos, es de naturaleza iónica y tiene alto coeficiente positivo de temperatura (es decir, que cuanto más se eleva la temperatura más conductor se hace el material considerado). El cambio de conductividad en función de la temperatura, está expresado por

$$G = G_o\, e^{a/T}$$

G_o = conductividad a 20° C, en siemens/cm
a = constante, distinta para cada líquido
T = temperatura absoluta, en °K

El aumento de conductividad con la temperatura es el resultado de un aumento en la movilidad de los iones, que se produce por la disminución de la viscosidad.

La conductividad de los líquidos puros puede ser extraordinariamente incrementada por pequeñas cantidades de impurezas o de humedad, que se ionizan rápidamente en el líquido. Afortunadamente el grado de ionización es función de la constante dieléctrica de forma que los líquidos no polares, cuya constante dieléctrica es baja, son menos sensibles a las impurezas, especialmente cuando el grado de concentración es pequeño. La dificultad de evitar la contaminación de los líquidos de alta constante dieléctrica, impide su empleo como dieléctricos de condensadores. En general, la característica de resistividad de los líquidos comercialmente puros está, aproximadamente, en razón inversa con las constantes dieléctricas respectivas.

Constante dieléctrica. En lo que se refiere a la *constante dieléctrica* de los materiales aislantes líquidos, resulta extraordinariamente variable, puesto que está comprendida entre 1,5 y 100. En los líquidos

no polares, y a la temperatura ambiente, el valor de la constante dieléctrica está comprendido entre 1,84 y 2,3. Las constantes dieléctricas de los líquidos no polares son independientes de la frecuencia y sólo varían ligeramente con la temperatura, debido a la dilatación térmica. Por el contrario, los líquidos polares tienen constantes dieléctricas muy elevadas, pero que varían notablemente con la frecuencia y la temperatura. Cuando un líquido polar se congela, desaparece parte de la influencia de los dipolos y la constante dieléctrica desciende muy bruscamente. Normalmente, las variaciones grandes de constante dieléctrica con la frecuencia o con la temperatura están asociadas con altos factores de potencia para la misma frecuencia y temperatura.

Rigidez dieléctrica. El estudio del fenómeno de la perforación eléctrica debe considerarse en los dos casos siguientes:

a) líquidos puros,
b) líquidos impuros.

La perforación en líquidos puros se produce probablemente por un proceso de ionización similar al de los gases y favorecido por los elevados gradientes de tensión que crean las cargas espaciales en las proximidades de los electrodos. Los cambios de presión no ejercen prácticamente ningún efecto, pero el aumento de temperatura disminuye la resistencia a la perforación, particularmente con temperaturas próximas al punto de ebullición del líquido considerado.

En los líquidos impuros, la perforación se produce con tensiones mucho menores, por diversas razones, la más importante de ellas es la presencia de gases en suspensión o de humedad. El campo electrostático tiende a liberar los gases disueltos y como la rigidez dieléctrica del gas es solamente la décima parte de la del líquido, el gas se ioniza, iniciándose la descarga. Los efectos perjudiciales de las impurezas y los gases, aumentan extraordinariamente con la presencia de fibras u otras partículas sólidas en suspensión, que absorben las impurezas, provocando "puentes" o "canales" si su constante dieléctrica es mayor que la del líquido. Una pequeña proporción de impurezas produce, por lo general, una marcada disminución de la resistencia a la perforación, pero las proporciones mayores apenas aumentan este efecto.

El efecto de la temperatura sobre la perforación en los líquidos impuros, depende de la naturaleza de la impureza. Los materiales de baja constante dieléctrica son más fácilmente eliminados cuando se reduce la viscosidad por elevación de la temperatura pero, como se ha visto anteriormente, en este caso, la conductividad del aislante

líquido resulta aumentada. La presión aumenta la rigidez dieléctrica, por impedir la eliminación de los gases o la vaporización de los líquidos.

Pérdidas dieléctricas y factor de potencia. El factor de potencia de la mayoría de aislantes líquidos no polares, está comprendido entre 0,0001 y 0,01. El factor de potencia a 50 Hz es influenciado por la conductividad eléctrica en corriente continua y su valor acostumbra a duplicarse cada 10 ó 20° C de elevación de temperatura. En el campo de las altas frecuencias el factor de potencia de los dieléctricos no polares apenas varía con la temperatura.

Algunos aceites minerales, que son líquidos no polares, pueden contener impurezas polares, que producen picos característicos en las curvas de variación del factor de potencia a frecuencias o temperaturas en que se producen cambios bruscos de la constante dieléctrica.

Propiedades físico-químicas de los materiales aislantes líquidos

A continuación, se definen algunas de las propiedades físico-químicas más importantes de los materiales aislantes líquidos.

Viscosidad. La *viscosidad* es la resistencia de los líquidos a fluir. Para comprender mejor este concepto, imaginemos en un líquido una lámina plana e infinitamente delgada de este líquido, limitada por un contorno cualquiera: si se intenta mover esta lámina en su mismo plano, la resistencia que se opone a este movimiento, debida al rozamiento de la lámina con las moléculas del resto del líquido, es la *viscosidad*, la cual depende de tres factores:

a) es proporcional a la superficie S de la lámina.
b) es proporcional a la velocidad de traslación v
c) es inversamente proporcional al espesor h de la lámina.

$$F_v = \mu\, S\, \frac{v}{h}$$

F_v = fuerza de rozamiento
S = superficie de la lámina
v = velocidad de traslación
h = espesor de la lámina
μ = constante de proporcionalidad, denominado también *coeficiente de viscosidad absoluta*

De la fórmula anterior, puede deducirse el valor del coeficiente de viscosidad μ

$$\mu = \frac{F_v\, h}{S\, v}$$

y expresando estas magnitudes por sus unidades cegesimales correspondientes:

$$\mu = \frac{dinas \cdot cm \cdot seg}{cm^2\ cm} = \frac{dinas \cdot seg}{cm^2}$$

Por lo tanto, la *unidad de viscosidad absoluta* puede definirse como la viscosidad de un fluido que opone la resistencia de una dina al deslizamiento de una superficie de 1 cm², a la unidad de velocidad (1 cm por segundo), con respecto a otra superficie plana colocada a la distancia de 1 cm. La unidad de viscosidad absoluta es el *poise* y vale

$$1\ poise = 1\ \frac{dina \cdot seg}{cm^2}$$

Como el poise es una unidad muy grande, corrientemente se emplea el *centipoise*, que es la centésima parte del anterior y que, muy aproximadamente, equivale a la viscosidad absoluta del agua a 20° C.

En el sistema de unidades práctico, la unidad de viscosidad absoluta no tiene nombre especial y vale

$$1\ \frac{kg\ seg}{m^2}$$

La equivalencia entre las unidades expresadas, es la siguiente:

$$1\ \frac{kg\ seg}{m^2} = 98{,}1\ poises$$

$$1\ \frac{kg\ seg}{m^2} = 9\,810\ centipoises$$

$$1\ poise = 1{,}02 \times 10^{-2}\ \frac{kg\ seg}{m^2}$$

$$1\ centipoise = 1{,}02 \times 10^{-4}\ \frac{kg\ seg}{m^2}$$

A la viscosidad absoluta se la llama también *viscosidad dinámica*.

Se llama *viscosidad relativa* o, también, *viscosidad cinemática*, a la relación entre la viscosidad absoluta de un líquido y su densidad, es decir

$$\mu_o = \frac{\mu}{d}$$

Como unidad de viscosidad relativa se emplea comúnmente el *stoke*, definido de la siguiente forma

$$1 \text{ stoke} = \frac{1 \text{ poise}}{\text{densidad}}$$

y, muchas veces, la centésima parte del stoke, llamada *centistoke*, definida por

$$1 \text{ centistoke} = \frac{1 \text{ centipoise}}{\text{densidad}}$$

1 que corresponde aproximadamente a la viscosidad relativa del agua a 20° C.

Puede pasarse de las unidades de viscosidad absoluta a la relativa, o viceversa, por las siguientes relaciones

$$\text{poises} = \text{stokes} \times \text{densidad}$$

$$\text{centipoises} = \text{centistokes} \times \text{densidad}$$

Las unidades de viscosidad citadas hasta ahora se emplean casi exclusivamente en investigaciones científicas, ya que la determinación directa de la viscosidad, tanto absoluta como relativa, es muy laboriosa. En la práctica industrial, se mide la viscosidad en aparatos denominados *viscosímetros*, por medio de los cuales se determina el tiempo que tarda en vaciarse un volumen fijo de líquido, a una temperatura determinada. Es decir que, en realidad, miden el tiempo que una masa determinada tarda en recorrer una longitud determinada. Los viscosímetros más utilizados, son los siguientes:

1. *Viscosímetro Engler*, empleado, sobre todo, en Europa continental.
2. *Viscosímetro Saybolt*, empleado principalmente en Estados Unidos.
3. *Viscosímetro Redwood*, utilizado generalmente en Inglaterra.

Los grados de viscosidad que se miden con los viscosímetros, deben acompañarse siempre de la indicación del aparato utilizado

o su inicial, y la temperatura a que se ha realizado la medida. Por ejemplo, la indicación.

$$5{,}35\ E_{60}$$

expresa que la medición se ha realizado con un viscosímetro Engler, a una temperatura de 60° C; si las temperaturas son centígradas se ponen como índice inferior y si son temperaturas Fahrenheit, se ponen como índice superior.

En lo que sigue, nos referiremos siempre a los grados de viscosidad del viscosímetro Engler que, como hemos dicho, es el más empleado en Europa. La viscosidad expresada en grados Engler, puede expresarse también en las unidades correspondientes a la viscosidad relativa, pero no en virtud de una pura proporcionalidad. Por lo general, se proporcionan tablas que expresan la equivalencia aproximada entre los grados Engler y las unidades de viscosidad relativa; a continuación, se indica una tabla de este tipo, suficiente para casi todas las aplicaciones prácticas.

TABLA 68. EQUIVALENCIA ENTRE UNIDADES DE VISCOSIDAD

Centistokes	Grados Engler	Centistokes	Grados Engler
1 600	209,80	80	10,75
1 500	196	70	9,20
1 400	184	60	7,90
1 300	171	50	6,63
1 200	157,50	40	5,35
1 100	145	30	4,10
1 000	132	20	2,88
900	118,50	10	1,84
800	105	9	1,72
700	92	8	1,64
600	79	7	1,54
500	66	6	1,47
400	52	5	1,40
300	39	4	1,30
200	26	3	1,21
100	13,75	2	1,10
90	12,25	1	1

La viscosidad de los aislantes líquidos disminuye al elevar su temperatura y, en muchos casos, resulta conveniente conocer esta variación cuando dichos líquidos han de trabajar a temperaturas relativamente elevadas.

La escala de variación de viscosidad de los líquidos con la temperatura se expresa por un *índice de viscosidad:* cuanto más alto sea este índice, menor será la variación de viscosidad con la temperatura. La determinación del índice de viscosidad, se realiza con ayuda de tablas o de ábacos, cuya explicación nos llevaría muy lejos en nuestro propósito: basta con que el lector tenga una idea intuitiva de este concepto.

Puntos de inflamación y de combustión. Se denomina *punto de inflamación* de un líquido, a la temperatura mínima a la cual los vapores desprendidos por el líquido se inflaman en presencia de una llama; la determinación del punto de inflamación se realiza calentando poco a poco el líquido, por métodos y condiciones bien determinados. Si, después de haber llegado al punto de inflamación, se continúa calentando el líquido, llega un momento en que empieza a arder ininterrumpidamente. Se denomina *punto de combustión* a la temperatura a partir de la cual, el líquido arde durante cinco segundos, por lo menos, y sin interrupción.

Puntos de congelación y de descongelación. A bajas temperaturas, los aislantes líquidos se vuelven mas viscosos. La primera anormalidad que se observa al descender la temperatura, es la aparición de una especie de niebla en la masa del líquido; la temperatura a que tiene lugar este fenómeno se denomina *punto de niebla.*

Si continúa el descenso de temperatura, llega un momento en que el líquido se solidifica. Se denomina *punto de congelación,* a la temperatura en que la masa líquida se ha convertido en un cuerpo sólido.

Se denomina, por otra parte, *punto de descongelación,* a la temperatura en que el líquido pasa del estado sólido al estado líquido.

Para determinar el punto de congelación de un material aislante líquido, se introduce una porción de este líquido en un tubo de ensayo, la temperatura a la cual puede ponerse el tubo de ensayo horizontal sin que, durante cinco segundos, se deforme la superficie del líquido contenido en el tubo, se considera el punto de congelación.

Se considera como punto de descongelación, a la temperatura en la cual queda liberada una pieza pesada, bloqueada por el líquido en el momento de su congelación.

Relacionado con los anteriores conceptos, está el *punto de fluidez,* es decir, la temperatura a partir de la cual, la viscosidad del líquido solidificado, se hace sensible a un calentamiento progresivo.

Oxidación y polimerización. En presencia de oxígeno y bajo los efectos de temperaturas elevadas muchos materiales aislantes líquidos (por ejemplo, los aceites aislantes) tienden a *oxidarse,* formando depósitos granulosos o de consistencia bituminosa. Esta alteración es tanto más pronunciada cuanto más elevada es la temperatura, por ejemplo, en contacto con los devanados de transformadores que están sumergidos en aceite aislante, en los cuales se forman revestimientos sólidos que cubren los devanados con una capa bituminosa mal conductora del calor, lo que tiene por efecto acelerar aún más la formación de depósitos. Como consecuencia de estas alteraciones, los aislantes líquidos pueden llegar a quedar fuera de uso, por obstrucción de los canales de circulación, deterioro de los devanados, etc.

La oxidación de un aislante líquido se traduce, ante todo, por un aumento de la viscosidad, de la temperatura de inflamación de los vapores y del contenido de ácidos.

El fenómeno de *polimerización* o aglomeración de varias moléculas en una sola se presenta en algunos aislantes líquidos cuya composición química no es estable (por ejemplo, en los aceites vegetales constituidos por combinaciones de alcoholes con ácidos orgánicos). Por efecto de la polimerización, el aislante líquido se vuelve más viscoso y disminuye su poder refrigerante.

Los fenómenos de oxidación y de polimerización provocan, sobre todo, la formación de alquitrán y de asfalto, por lo que los materiales aislantes líquidos que pueden provocar la formación de estas sustancias, no son aptos para su empleo como dieléctricos ya que con ello quedan disminuidos su poder refrigerante y su rigidez dieléctrica.

Para comprobar la propensión a formar alquitrán que tiene un material aislante líquido, se recurre a la determinación del *índice de alquitrán* que, en los buenos aceites aislantes no debe ser superior a 0,1 %.

Los efectos de oxidación y de polimerización pueden estar provocados por la presencia de oxígeno, por las temperaturas elevadas de funcionamiento, por la acción de los arcos eléctricos y subsiguientes fenómenos de oxidación y de polimerización, la carga, etc. Estos procesos progresan con el tiempo, provocando el *envejecimiento* de los materiales aislantes líquidos que pierden, progresivamente, sus buenas cualidades físicas, químicas y eléctricas.

Contenido de ácidos. Los depósitos sólidos contenidos en los materiales aislantes líquidos producen diversos productos ácidos que tienen un efecto corrosivo sobre los metales y constituyen un peligro para los devanados y piezas metálicas, que pueden quedar destruidos por perforación rápida de los aislantes que, a su vez, se descomponen y disgregan.

Además estos productos ácidos reducen las propiedades dieléctricas de los materiales aislantes líquidos.

La cantidad de ácidos contenida en un aislante líquido se mide, por el *grado de acidez*, que es la cantidad de hidróxido potásico (KOH), expresada en miligramos, necesaria para neutralizar un centímetro cúbico del aislante líquido considerado. Por ejemplo, si se dice que el grado de acidez de un aislante líquido es de 0,12, significa que se necesitan 0,12 miligramos de hidróxido potásico para neutralizar 1 cm^3 del aislante. Como dato de referencia diremos que en un buen aceite aislante, el grado de acidez no debe ser superior a 0,05.

Contenido de azufre. Muchos aislantes líquidos contienen azufre, procedente de los cuerpos orgánicos o inorgánicos con los que se ha formado el aislante. El azufre tiene una desfavorable influencia sobre las propiedades dieléctricas de los aislantes líquidos y, en lo posible, debe eliminarse antes de la utilización del material aislante. Las normas de cada país y las recomendaciones de los fabricantes, establecen la proporción máxima de azufre que puede contener cada uno de los materiales aislantes líquidos normales utilizados en Electrotecnia.

Contenido de humedad. La presencia de agua en los materiales líquidos puede deberse a varias causas, entre las que pueden citarse:

a) un material aislante líquido, en contacto con aire húmedo, se carga de agua que queda en suspensión, en forma de finísimas gotitas. La elevación de la temperatura durante el funcionamiento, favorece este fenómeno, ya que al aumentar la temperatura se dilata el aislante y, si está en contacto con el aire, recoje parte de su humedad, aumentando la cantidad de agua a medida que transcurre el tiempo. Las gotitas de agua, al aumentar de volumen descienden al fondo del depósito que contiene el líquido aislante, donde se van acumulando.

b) La acción del oxígeno sobre ciertas moléculas de hidrocarburos, provoca la liberación de átomos de hidrógeno, el cual se combina con el oxígeno del aire o el contenido en el seno del líquido, para formar agua que, como la anterior, se va acumulando en el fondo del depósito.

El agua producida por las diversas causas citadas, se fija en las moléculas del dieléctrico líquido, sobre las fibras en suspensión, etc. El efecto conjunto es una disminución de las propiedades eléctricas del aislante líquido considerado, sobre todo en lo que hace referencia a su rigidez dieléctrica. Por esta causa, en los dieléctricos líquidos

debe procederse periódicamente a la eliminación del agua formada durante el funcionamiento, sobre todo, si estos dieléctricos están en contacto con el aire ambiente, o sometidos a elevadas temperaturas de servicio.

Materiales aislantes líquidos empleados en Electrotecnia

Aunque existen bastantes sustancias líquidas con buenas propiedades dieléctricas, los fenómenos de oxidación y de polimerización que se producen en casi todas ellas, ha limitado el número de éstas que pueden emplearse en aplicaciones electrotécnicas. Efectivamente y además de las buenas propiedades dieléctricas, para la utilización de un material líquido como dieléctrico, es necesario que tenga buena estabilidad química de forma permanente pues, ya hemos visto en el parágrafo anterior que los fenómenos de oxidación y el contenido de ácidos, alquitrán, materias orgánicas y otras impurezas reducen extraordinariamente las propiedades dieléctricas de los aislantes líquidos, provocando un prematuro envejecimiento de estos.

Los materiales líquidos que reúnen buenas cualidades dieléctricas y buena estabilidad química son, casi todos, *aceites* vegetales y minerales, convenientemente tratados, que reciben el nombre general de *aceites aislantes*. Además, se emplean otros materiales sintéticos, como los *hidrocarburos clorados* y las *siliconas líquidas*. Finalmente, algunos productos como el *tetracloruro de carbono* y el *agua pura*, deben considerarse también como líquidos aislantes aunque, por diversas circunstancias, que se examinarán en su momento, no tienen aplicación directa como tales materiales aislantes.

A continuación, se estudiarán todos los materiales aislantes líquidos que se han citado en el párrafo anterior.

Aceites aislantes

Los *aceites aislantes* se emplean de diversas maneras: en los transformadores e interruptores, por inmersión de estos aparatos; en la impregnación de materiales fibrosos y otros materiales como, por ejemplo, en la fabricación de conductores eléctricos. Los aceites secantes (aceite de linaza y otros) se emplean en la fabricación de barnices aislantes y como recubrimiento de papeles y materiales textiles. Finalmente, se emplean también como dieléctricos de condensadores.

Prácticamente, todas las variedades de aceite tienen buenas propiedades dieléctricas. Pero, como se ha dicho anteriormente, no todos

los aceites pueden emplearse como materiales aislantes; para poder juzgar si un aceite es apropiado como material aislante, deben tenerse en cuenta las siguientes características:

a) tendencia a la sedimentación
b) pérdidas por evaporación
c) viscosidad a diferentes temperaturas
d) estabilidad química
e) peso específico y coeficiente de dilatación
f) temperatura de inflamación
g) temperatura de congelación
h) absorción de humedad
i) rigidez dieléctrica
j) resistividad eléctrica
k) conductividad térmica
l) calor específico

Una de las principales ventajas de todos los aceites aislantes es su propiedad de autorregenerarse después de una perforación dieléctrica o de una descarga disruptiva; sin embargo, hay que tener en cuenta, que esta propiedad no es independiente de la energía de descarga y, si ésta es muy elevada, puede sobrecalentar el aceite, provocando su combustión.

La mayor desventaja de los aceites aislantes es que son inflamables y pueden provocarse acciones químicas por arcos eléctricos o por descarga estáticas, con desprendimiento de gases combustibles, tales como hidrógeno e hidrocarburos ligeros (metano y otros), que se vuelven explosivos al mezclarse con aire.

Los aceites aislantes utilizados en aplicaciones electrotécnicas, pueden clasificarse como sigue:

1. Aceites vegetales
2. Aceites resinosos
3. Aceites minerales
4. Aceites minerales mezclados con resinas

A continuación, se estudian con detalle los diversos tipos de aceite citados anteriormente.

Aceites vegetales

Los *aceites vegetales* se emplean, sobre todo, para impregnación de papeles y tejidos aislantes y como secantes en la fabricación de

barnices aislantes aunque, modernamente, tienden a sustituirse por materiales plásticos. Seguidamente, se citan los más interesantes aceites vegetales, desde el punto de vista electrotécnico:

Aceite de linaza. Se obtiene a partir de las semillas del lino que, después de limpiados en un tamiz y desprovistos de las vainas, se trituran en un molino. Por lo general, el aceite se extrae por prensado y en caliente; algunas veces, con ayuda de disolvente, tales como el éter de petróleo.

Aun después de filtrado, el aceite de linaza contiene impurezas, que deben eliminarse. Para ello, se procede por decantación, dejando que las impurezas se depositen en el fondo o, en otros casos, por procedimientos diversos (calentamiento y enfriamiento sucesivos, empleo de sustancias químicas, etc.) que aceleran el proceso de purificación del aceite.

El aceite de linaza está constituido por glicéridos de ácidos grasos, mezclados con ácidos saturados, siendo muy variable la proporción de estos cuerpos, lo que influye en sus propiedades, que difieren mucho según el lugar de procedencia del aceite.

El aceite de linaza se emplea, sobre todo, como secante de los barnices aislantes. Aún no se conoce exactamente el proceso que sigue esta sustancia en su rápida desecación, que parece deberse a ciertas acciones químicas y coloidales, las cuales favorecen la oxidación del aceite, con desprendimiento de productos ligeros (agua, óxido de carbono, anhídrido carbónico, etc.).

A continuación se citan algunas propiedades características del aceite de linaza:

Peso específico a 15° C: 0,932 a 0,936 gr/cm³

Resistividad volumétrica: $0{,}61 \times 10^{12}$ ohmios cm²/cm

Constante dieléctrica ε: 3,3

Aceite de tung. También se denomina *aceite de China*, *aceite de madera de China* y *aceite de chinaché*. Se obtiene de las semillas del árbol tung y otros, que crecen en las partes montañosas de Extremo Oriente. Estas semillas son parecidas a las nueces ordinarias y llevan varias celdillas que contienen un gramo cada una; se secan, se tuestan y, finalmente, se trituran, extrayendo posteriormente el aceite por presión.

El aceite fresco es muy venenoso y de olor desagradable, está constituido a base de ácidos grasos (oleico, linoleico, etc.).

En Electrotecnia se emplean, sobre todo, debido a dos excelentes propiedades:

a) se seca muy rápidamente, tanto en tiempo seco como en tiempo húmedo.

b) actúa como acelerador de oxidación en las mezclas con aceite de linaza y aceite de tung que se secan mucho más rápidamente juntos que separados.

La película que forma el aceite de tung es más dura, más quebradiza y más impermeable que la de aceite de linaza. Aunque se emplea cocido, deben tomarse ciertas precauciones para evitar que se endurezca rápidamente. Mediante calentamiento lento o instantáneo, en vacío o bajo presión, se obtienen diversos productos, todos de gran interés electrotécnico.

A continuación, se citan algunas propiedades características del aceite de tung:

Peso específico a 15° C: 0,938 a 0,942 gr/cm³
Resistividad volumétrica: $0{,}08 \times 10^{12}$ ohmios cm²/cm
Constante dieléctrica ε: 3,5

Aceites resinosos

Son productos que resultan de la destilación seca de colofonia y otras resinas naturales (véase el capítulo correspondiente). Actualmente, ya no se emplean como dieléctrico de transformadores donde han sido sustituidos por los aceites minerales y apenas se utilizan para la impregnación de conductores eléctricos.

Su principal aplicación está en la preparación de masas aislantes de relleno para manguitos de empalme, manguitos terminales, etc., de cables subterráneos, ya que tienen buena capacidad de penetración del papel aislante y buenas propiedades dieléctricas.

Tienen el inconveniente de su tendencia a la polimerización.

Aceites minerales

Casi en todas las aplicaciones electrotécnicas que precisan de aceites aislantes (interruptores, condensadores, transformadores, etc.) se emplean *aceites minerales*, sobre todo en servicios en los que el aislante líquido haya de estar en contacto con el aire, debido, principalmente, a sus buenas propiedades dieléctricas, su excelente estabilidad química y su baratura, en comparación con otros aceites aislantes de origen vegetal.

Los aceites minerales aislantes se extraen de los petróleos brutos y están constituidos por mezclas, en diversas proporciones, de varios hidrocarburos. Son cuerpos grasos minerales que, al contrario de los cuerpos grasos vegetales o animales, no se descomponen por la acción de los álcalis, es decir, que resultan insaponificables.

De una forma resumida, se puede decir que los diferentes hidrocarburos que constituyen los aceites minerales, se dividen en dos grandes grupos:

1. **Hidrocarburos saturados.** A su vez, se subdividen en dos clases:

a) *Hidrocarburos saturados en cadena abierta (alifáticos).* Todos los enlaces de los átomos de carbono están cubiertos. También se les llama *parafinas* y tienen la fórmula general

$$C_n H_{2n+2}$$

Estos hidrocarburos tienen gran resistencia a los reactivos.

b) *Hidrocarburos saturados en cadena cerrada (cíclicos)*, que también son químicamente estables, pero que pueden dar, más fácilmente, productos de sustitución.

2. **Hidrocarburos no saturados**, también subdivididos en dos clases:

a) *Hidrocarburos no saturados en cadena abierta (oleofínicos)*, cuya fórmula general es

$$C_n H_{2n}$$

Estos hidrocarburos pueden absorber hidrógeno, oxígeno y azufre.

b) *Hidrocarburos no saturados en cadena cerrada (terpénicos)*, que son químicamente muy inestables y se polimerizan fácilmente, produciendo sustancias sólidas denominadas *asfaltos*.

Los aceites minerales, se dividen generalmente en tres clases, según la proporción de los diversos hidrocarburos que entran en su composición:

1.° *Aceites parafínicos*, cuando contienen más de 65 % de hidrocarburos parafínicos, el resto está constituido, generalmente, por hidrocarburos oleofínicos. Proceden, principalmente, de los yacimientos petrolíferos de Pennsylvania.

2.° *Aceites asfálticos,* constituidos principalmente por hidrocarburos terpénicos. Proceden de California y Tejas y son los menos apropiados para aplicaciones aislantes.

3.° *Aceites naftalénicos,* que contienen más de 65 % de hidrocarburos cíclicos. Están casi totalmente exentos de parafina, son químicamente muy estables y prácticamente incongelables a las más bajas temperaturas de Europa Occidental. Proceden de los yacimientos petrolíferos de la U.R.S.S.

Obtención y tratamiento de los aceites minerales

Los aceites minerales naturales o *petróleos* constituyen mezclas de gran variedad de hidrocarburos, que pueden separarse por destilación, aprovechando la propiedad de que sus puntos de ebullición varían como sus pesos moleculares. La destilación no se efectúa a una temperatura determinada, sino entre ciertos límites de temperatura, de forma que los productos destilados constituyan nuevas agrupaciones de hidrocarburos. De esta forma, se obtienen sucesivamente los siguientes productos:

1. *Eter de petróleo*
2. *Esencia de petróleo*
3. *Queroseno*
4. *Aceites de gas*
5. *Aceites lubricantes*
6. *Aceites de parafina*
7. *Alquitranes y breas*
8. *Coque,* residuo sólido

Los aceites minerales utilizados como materiales aislantes se seleccionan en el fraccionamiento de aceites de gas o de los aceites lubricantes. Las propiedades de estos aceites dependen del tratamiento y, sobre todo, del origen de los petróleos, tal como hemos visto en el anterior parágrafo.

El aceite mineral aislante debe estar exento de alquitrán y de azufre por lo que el obtenido por destilación debe someterse a la operación de refinado, para la eliminación de dichas sustancias.

El *refinado* consiste en tratar el aceite mineral con ácido sulfúrico, que precipita los alquitranes. Por decantación, se recoge el aceite limpio; pero como aún tiene carácter ácido, debe neutralizarse. La adición de ácido requiere grandes precauciones, ya que este reactivo elimina los alquitranes pero puede ocasionar también la destrucción

de los compuestos estables del aceite por lo que éste resulta, algunas veces, químicamente menos estable que antes de su refinado.

Actualmente, el refinado se hace en varias operaciones consecutivas. Incluso se admite una pequeña proporción de ácido, completándose el tratamiento con una filtración en la que se absorben las moléculas más pesadas y menos estables, que deben eliminarse del aceite.

Después del refinado, debe eliminarse el agua que contiene el aceite mineral, mediante la operación de *deshidratación,* para la que se siguen varios procedimientos, algunos de los cuales se resumen a continuación:

1.° *Procedimientos químicos.* Los más utilizados son los siguientes:

a) *Por adición de cal viva.* Se proyecta cal viva sobre el aceite, que se agita de cuando en cuando y se filtra después de deshidratado.

b) *Por adición de cloruro cálcico.* Este producto está contenido en un tubo de metal perforado, colocado en la cuba a medio nivel del aceite mineral.

2.° *Procedimientos físicos.* Entre éstos, se pueden citar:

a) *Por calefacción directa.* El aceite es calentado directamente por medio de resistencias de calefacción o por insuflación de gases calientes. El caldeo por resistencias tiene la ventaja de ser sencillo y eficaz, aunque existe el inconveniente de su larga duración; además existe el peligro de que, si las resistencias alcanzan temperaturas de unos 100° C, se produce una rápida oxidación del aceite si éste se halla en contacto con el aire. El caldeo por insuflación provoca sobrecalentamientos locales, debido a la mala conductibilidad térmica del aceite, produciéndose descomposiciones que reducen la estabilidad química del aceite deshidratado.

b) *Por calefacción en vacío.* Este procedimiento es de larga duración y exige además un material costoso. A pesar de sus innegables ventajas sobre el procedimiento explicado anteriormente, aún se aprecian ciertas trazas de asfalto coloidal, formado por condensación durante el proceso de calefacción en la estufa.

c) *Por filtración.* Este procedimiento consiste en la filtración por papel secante y bajo presión; es muy costoso si se quieren obtener buenos resultados. Además existe el peligro de la incorporación al aceite de partículas fibrosas procedentes de la celulosa del papel secante.

d) *Por centrifugación.* La centrifugación directa no permite la completa deshidratación del aceite. Para conseguir un resultado más eficaz debe utilizarse un absorbente que arrastre el agua y que sea más sensible que ésta a la acción de la fuerza centrífuga: para ello se emplea sílice. Pero, frecuentemente, la presencia de partículas finas de los cuerpos absorbentes modifica desfavorablemente, las propiedades dieléctricas del aceite.

Refinado electrocapilar. Ninguno de los procedimientos industriales explicados anteriormente dan resultados satisfactorios, en lo que se refiere a la separación de todos los elementos sólidos, y a la deshidratación y clarificación de los aceites minerales aislantes.

El problema ha quedado resuelto industrialmente, mediante el empleo de una membrana filtrante, de un material especial, tratada con reactivos adecuados, y que actúa sobre el aceite por capilaridad. La entrada de la membrana se somete a la acción de cargas eléctricas: si la pared del filtro tiene cargas estáticas del mismo signo que las partículas en suspensión en el seno del aceite filtrado, estas últimas quedan sometidas a una acción repelente y el líquido se clarifica. Otra ventaja de estas membranas sobre los filtros ordinarios está en que se pueden establecer canales de evacuación de las impurezas mucho mayores.

Propiedades de los aceites minerales

En los diversos países se han reglamentado las características físicas, químicas y eléctricas mínimas, que deben cumplir los aceites minerales para que puedan utilizarse como dieléctricos. A continuación, se citan estas propiedades, resumiendo lo establecido por las normas alemanas (V. D. E.), americanas (A. S. T. M.) y francesas (U. T. S. E.).

Peso específico. No debe ser inferior a 0,85 gr/cm³ ni superior a 0,95 gr/cm³, a 20° C. El peso específico constituye una característica de cada clase de aceite y, por lo tanto, un punto de referencia importante para poderlo calificar. La reducción del peso específico a una temperatura t, al peso específico a 20° C, se hace mediante la fórmula

$$\gamma_{20} = \gamma_t \, [1 + \alpha \, (t - 20)]$$

γ_{20} = peso específico a 20° C

γ_t = peso específico a la temperatura t

α = coeficiente de dilatación del aceite = 0,0007

Si, por ejemplo, un aceite mineral tiene un peso específico de 0,842 gr/cm³ a 40° C, el peso específico a 20° C será

$$\gamma_{20} = 0{,}842 \; [1 + 0{,}0007 \; (40 - 20)]$$

$$\gamma_{20} = 0{,}854 \; gr/cm^3$$

Proporción de cenizas. Aunque los hidrocarburos puros no contienen ningún metal (calcio, silicio, sodio, hierro, etc.) en los aceites minerales existen pequeñas cantidades, que alteran desfavorablemente sus propiedades dieléctricas. Al calcinar un aceite mineral, quedan los metales bajo la forma de óxidos o de sales, mientras que el aceite propiamente dicho se volatiza y se queman sus partes orgánicas no volátiles. Según las prescripciones alemanas, la proporción total de cenizas, no debe ser superior a 0,01 %.

Viscosidad. Para la circulación del aceite y, por lo tanto, para su poder refrigerante, tiene mucha importancia su rozamiento interno, es decir, su viscosidad, concepto que se ha definido en un parágrafo anterior.

Según las normas alemanas, la viscosidad medida en el viscosímetro no debe ser superior a 8 grados Engler, para una temperatura de 20° C.

Según las normas francesas, la viscosidad medida en el viscosímetro no debe ser superior a 2,5 grados Engler, para una temperatura de 500° C.

Después, la viscosidad del aceite debe expresarse en unidades de viscosidad absoluta (es decir, en centipoises). Hemos visto que entre los grados Engler y las unidades de viscosidad absoluta no existe una proporción exacta. Se han determinado fórmulas aproximadas experimentales que expresan esta relación entre ambos tipos de unidades; para el aceite mineral, es válida la siguiente fórmula experimental:

$$\mu = 1{,}02 \; \gamma \left(7{,}4 \; E^\circ - \frac{6{,}4}{E^\circ} \right) \; centipoises$$

γ = peso específico del aceite en gr/cm³

E° = viscosidad expresada en grados Engler

Por ejemplo, si se trata de un aceite de las siguientes características:

$$\text{Peso específico } \gamma = 0{,}39 \ gr/cm^3$$

$$\text{Viscosidad Engler} = 6 \text{ grados}$$

resulta el siguiente valor para la viscosidad absoluta:

$$\mu = 1{,}02 \times 0{,}93 \left(7{,}4 \times 6 - \frac{6{,}4}{6} \right) = 41.103 \text{ centipoises}$$

Recuérdese que, según se indicó en un parágrafo anterior, la viscosidad varía con la temperatura.

Temperaturas de funcionamiento. Las temperaturas de funcionamiento están directamente relacionadas con los siguientes datos:

Punto de inflamación:

Aceite para transformadores: mínimo 130-135° C
Aceite para condensadores: mínimo, 149° C
Aceite para interruptores: mínimo 180° C

Punto de combustión:

Aceite para transformadores: mínimo 149° C
Aceite para condensadores: mínimo 170° C
Aceite para interruptores: mínimo 210° C

Punto de congelación:

Aceite para transformadores y condensadores: mínimo — 15° C
Aceite para interruptores: mínimo — 5° C

Punto de fluidez:

Aceite para transformadores y condensadores: máximo — 40° C
Aceite para interruptores: máximo — 10° C

Contenido de ácidos. El contenido de ácidos ha de ser tal que el grado de acidez de un aceite mineral, no debe ser superior a 0,05 miligramos de KOH necesarios para neutralizar 1 cm³ de aceite.

Contenido de azufre. Para conocer la existencia de azufre, se sumerge una varilla de cobre pulimentada y se observa cuanto tiempo tarda en ennegrecerse la varilla, a una temperatura de 85° C. Para considerar el aceite como un buen aislante, la varilla no debe ennegrecerse. Si el aceite contuviere azufre, debe eliminarse mezclando con el aceite, antes de la destilación polvo metálico, el cual se combina con el aceite, formando un compuesto, que queda con los residuos de la destilación.

Contenido de álcalis. Los aceites minerales aislantes deben estar exentos de álcalis.

Contenido de humedad. La cantidad de humedad influye notablemente en el valor de la rigidez dieléctrica del aceite, según se verá más adelante, por lo tanto, del valor de la rigidez dieléctrica, puede conocerse la proporción de agua existente. Cuando esta proporción es alta, puede denunciarse su presencia, sumergiendo en el aceite una barra metálica al rojo, porque entonces produce un chirrido característico. El aceite mineral para aplicaciones aislantes ha de estar prácticamente exento de humedad. Esta circunstancia se determina introduciendo en el aceite un hierro calentado a 600° C, que no debe crepitar.

Si, a causa del agua contenida en un aceite aislante, se acusa un descenso apreciable de la rigidez dieléctrica, debe procederse a la eliminación de la humedad sobrante. Para ello, puede calentarse el aceite hasta unos 120° C hasta que la rigidez dieléctrica haya recobrado un valor aceptable, pero este procedimiento tiene el inconveniente de que se pierde una cantidad apreciable de aceite por evaporación, de que el resto del aceite adquiere mayor viscosidad y de que el calentamiento debe prolongarse durante bastante tiempo, hasta conseguir un secado suficiente.

Actualmente, para deshidratar el aceite durante su funcionamiento, y a medida que se va formando agua en el seno del aislante, se emplea la *centrifugación*: se coloca el aceite caliente (para reducir el efecto del rozamiento interior) en un tambor giratorio con lo que el agua y demás impurezas, que tienen mayor peso específico que el aceite, se precipitan hacia la periferia del tambor, pudiendo de esta forma separarse del aceite. Como la diferencia entre los pesos específicos del agua y del aceite, es muy pequeña la centrifugación debe prolongarse durante bastante tiempo, hasta que el aceite quede libre de impurezas.

Para conseguir una eliminación más perfecta del agua contenida en el aceite, debe hacerse pasar éste sobre sustancias higroscópicas, tales como el cloruro de calcio, filtrando después con arena calcinada.

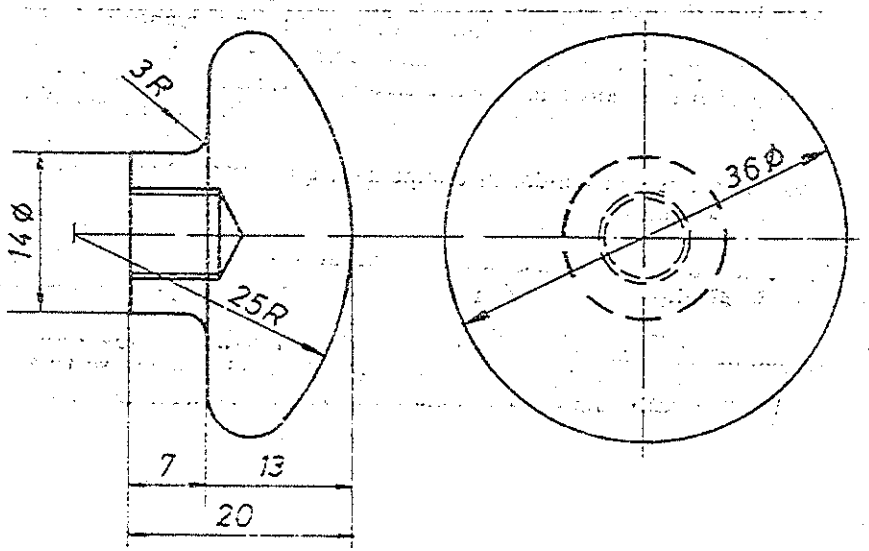


Fig. 88.—Electrodo para determinación de la rigidez dieléctrica de un aceite mineral.

También se obtiene una buena purificación, haciendo pasar el aceite a presión, a través de papel filtrante espeso, o de otras sustancias adecuadas.

Rigidez dieléctrica. Las pruebas para determinar la rigidez dieléctrica de los aceites minerales aislantes, varían según los distintos países. Con objeto de fijar mejor los conceptos, vamos a describir brevemente las pruebas especificadas por las normas alemanas V.D.E. Para ello se preparan dos electrodos de la forma y dimensiones indicadas en la figura 88; la distancia entre los bordes de éstos y las paredes aislantes del recipiente que contiene el aceite, no debe ser inferior a 12 mm. Los conductores, de 5 mm de diámetro, deben hallarse a una distancia de 45 mm la cantidad de aceite empleada en cada prueba, no debe ser inferior a 0,25 litros. En la figura 89 se representa el esquema de conexiones del dispositivo empleado para esta prueba.

Al verter el aceite en el recipiente, que ha sido previamente limpiado, se procede lentamente, de forma que el aceite descienda poco a poco a lo largo de las paredes del recipiente, con el objeto de evitar burbujas de aire, después, se deja reposar el aceite durante 10 mi-

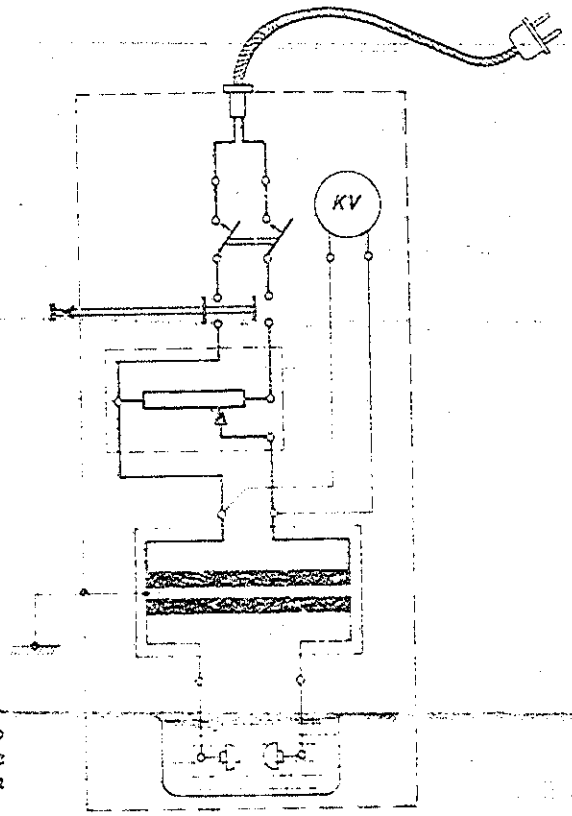


Fig. 89.—Esquema de conexiones de un dispositivo para la determinación de la rigidez dieléctrica de un aceite mineral.

nutos, antes de aplicar tensión. La prueba puede realizarse de dos formas:

a) conservando constante la separación entre electrodos (a = 3 mm) y variando la tensión.
b) conservando constante la tensión y variando la separación entre electrodos.

En serie con el trayecto de la descarga, se coloca una resistencia de 30 000 ohmios; el secundario del transformador debe dar una tensión mínima de 30 kV, con una potencia de 250 kVA.

Para cada prueba, se hacen seis descargas, y después de cada descarga, se remueve el aceite por medio de una varilla de cristal bien seca. La primera descarga no se tiene en cuenta, y se toma el

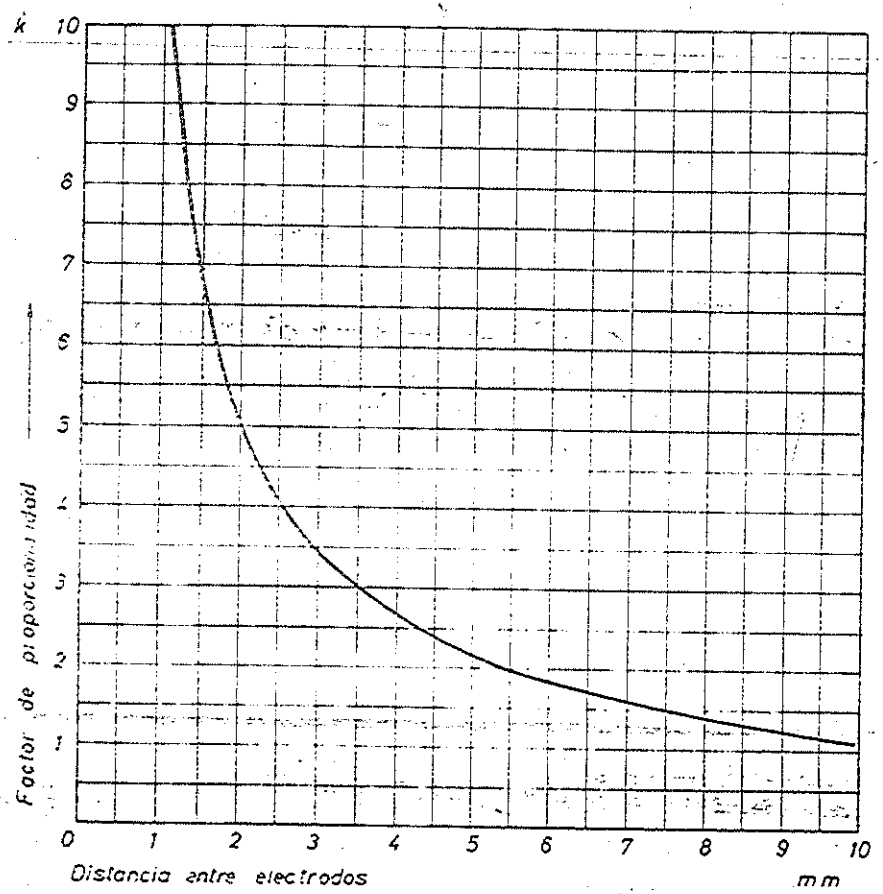


Fig. 90. — Valores del factor de proporcionalidad k, en función de la distancia entre electrodos, para la determinación de la rigidez dieléctrica de un aceite mineral.

valor medio de los valores correspondientes a las otras cinco descargas. En la curva de la figura 90, se busca el factor k que corresponde a la distancia a entre electrodos. La rigidez dieléctrica se deduce de la fórmula:

$$\mathcal{E} = k\,U$$

expresándose $\mathcal{E}$ en kV/cm y U en kV.

Por ejemplo, si la distancia entre electrodos es

$$a = 3\ mm$$

el factor k vale 3,5. Si se trata de una descarga de 30 kV, la rigidez dieléctrica vale

$$\mathcal{E} = 3{,}5 \times 30 = 105\ kV/cm$$

La temperatura durante la prueba debe estar comprendida entre 15 y 25° C.

El aceite nuevo debe tener una rigidez dieléctrica no inferior a 125 kV/cm. Después de cierto período de funcionamiento, el aceite mineral aislante debe renovarse o limpiarse cuando su rigidez dieléctrica descienda a valores inferiores a 80 kV/cm.

Constante dieléctrica. El valor de la constante dieléctrica debe estar comprendido entre 2 y 3.

Factores que influyen en la variación de las propiedades eléctricas de los aceites minerales

A pesar del mucho tiempo transcurrido desde que comenzaron a emplearse los aceites minerales como aislantes electrotécnicos, aún no se conoce bien la influencia de diversos factores (temperatura, presión, contenido de humedad, etc.) sobre las propiedades eléctricas de estos aceites, y las opiniones de los diferentes autores discrepan bastante entre sí.

Ante todo, no está completamente aclarado el fenómeno de la perforación eléctrica, es decir, la conversión de la elevada resistividad, característica de los materiales aislantes en una perfecta conductividad, que convierte al material aislante en conductor. Se supone que el aceite se calienta entre los electrodos, formándose burbujas de gas por lo que, en realidad, la perforación resulta ser un paso de electricidad a través de un gas; según esta teoría, el paso de la electricidad a través del aceite mineral y de otros aislantes líquidos, viene a ser una forma velada de paso de la electricidad a través de los gases. Naturalmente, nosotros no podemos extendernos en la explicación y fundamentos de esta teoría, lo que nos llevaría muy lejos en nuestro propósito; nos limitaremos a considerar cómo influyen diversos factores en las propiedades eléctricas de los aceites minerales aislantes, según las experiencias e investigaciones realizadas hasta ahora y advirtiendo al lector que los resultados obtenidos en estas experiencias deben considerarse solamente a título orientativo, ya que, como se ha dicho anteriormente, estos resultados varían según las fuentes de información que están a nuestro alcance.

Conductividad eléctrica. Algunos aceites aislantes de alta calidad tienen características eléctricas comparables a los de algunos líquidos muy refinados y poco conductores, utilizados en los trabajos de investigación física. Así, son frecuente conductividades del orden de los 10^{-15} siemens-cm. Pero, ni aún con los métodos más perfeccionados de purificación se ha conseguido obtener un líquido de conductividad nula (por lo tanto, un aislante perfecto), ni siquiera un líquido cuya conductividad permaneciera constante desde la primera aplicación de una tensión eléctrica.

Según datos experimentales, el aceite para transformadores tiene, aproximadamente, las siguientes resistividades en función de las temperaturas de servicio:

A 60° C: 28×10^{11} ohmios. cm²/cm
A 80° C: 9×10^{11} ohmios. cm²/cm
A 100° C: 4×10^{11} ohmios. cm²/cm
A 120° C: 2×10^{11} ohmios. cm²/cm

Como puede apreciarse, el valor de la resistividad varía mucho con la temperatura.

Constante dieléctrica. Experimentalmente, se ha comprobado que la constante dieléctrica de un aceite mineral es proporcional al peso específico y vale, aproximadamente:

$$\varepsilon = 2{,}6\ \gamma$$

Como, por otra parte, el peso específico decrece si aumenta la temperatura, también decrecerá la constante dieléctrica.

Efecto corona. Los datos conocidos hasta ahora parecen indicar que en el aceite mineral aislante se produce el efecto corona. No es tan definido como el aire y sólo se manifiesta antes de saltar la chispa entre conductores de pequeña sección y muy separados entre sí. El efecto corona debe evitarse en los aparatos industriales.

Rigidez dieléctrica. El valor de la rigidez dieléctrica aumenta con la temperatura, hasta unos 60° C (véase Fig. 91), porque hasta dicha temperatura baja la viscosidad, es decir, el rozamiento interno del aceite, tal como puede apreciarse en la misma figura. A partir de 60° C, la viscosidad permanece prácticamente constante, mientras que la rigidez dieléctrica vuelve a disminuir de valor. Sin embargo, estos valores no coinciden en todas las experiencias pues, otros investigadores encuentran el valor máximo de la rigidez dieléctrica

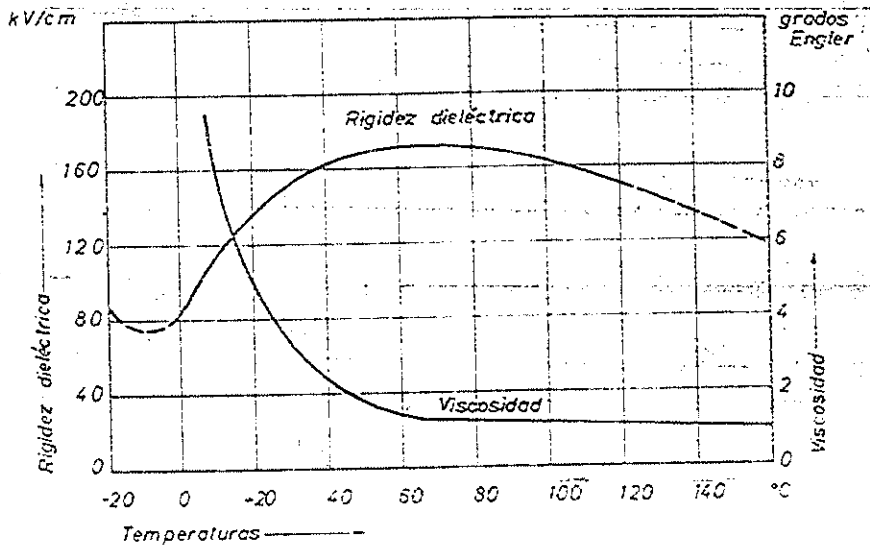


Fig. 91.—Valores de la rigidez dieléctrica y de la viscosidad de un aceite mineral, en función de la temperatura.

entre 85 y 90° C. El valor mínimo de la rigidez dieléctrica parece estar entre —10° C y 0° C.

Las impurezas contenidas en el aceite disminuyen considerablemente su rigidez dieléctrica siendo, al parecer, el agua la que más influye en esta variación, pues se ha observado que los aceites muy secos tienen elevada rigidez dieléctrica, aunque contengan sustancias fibrosas. Por el contrario, si el aceite adquiere humedad, ésta se concentra en las fibras, lo que aún agrava más el efecto perjudicial que en sí tiene la presencia de agua. En la figura 92 puede apreciarse cómo varía la rigidez dieléctrica en función del contenido de agua. Al llegar a 20 kV/cm, la rigidez se estabiliza a un valor prácticamente constante, debido a que con una proporción de agua tan elevada, las gotitas se reúnen formando gotas de mayor volumen, que descienden al fondo del recipiente.

Existen otros factores que afectan el valor de la rigidez dieléctrica. Se ha comprobado que con distancias disruptivas pequeñas (inferiores a 2,5 mm), este valor varía más que con grandes distancias disruptivas. A distancias de 5 mm y aún menores, la tensión de perforación disminuye cuando aumenta el tiempo de aplicación, aunque después de un minuto, esta disminución no es apreciable.

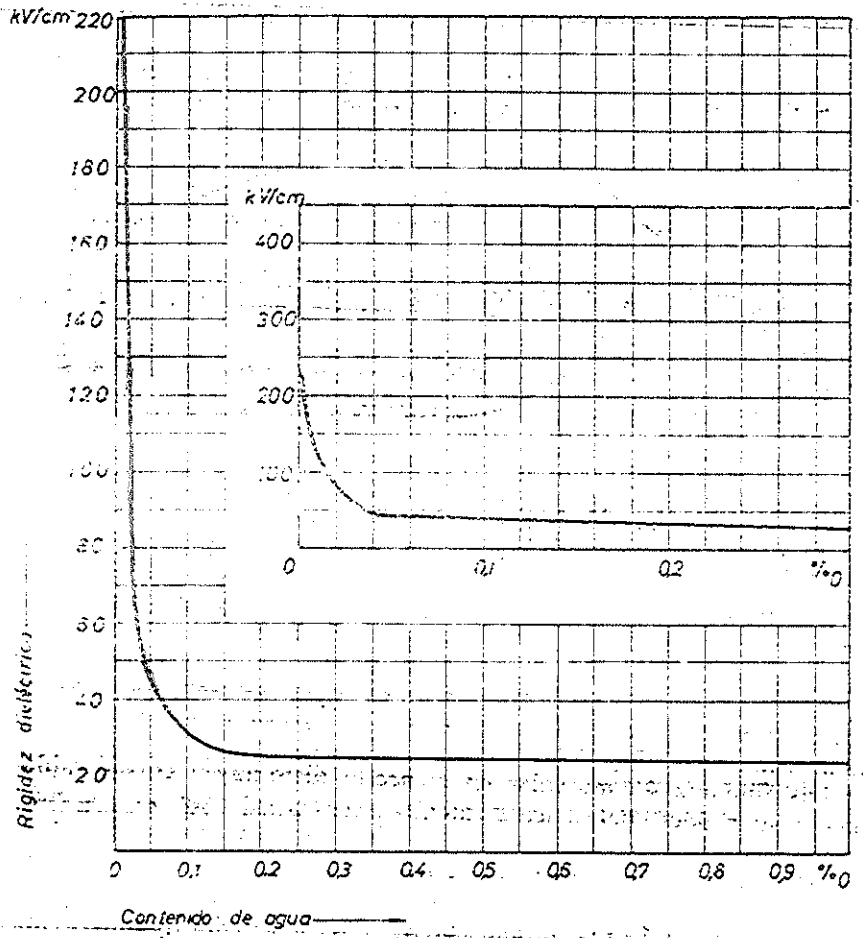


Fig. 92. — Valores de la rigidez dieléctrica de un aceite mineral, en función del contenido de agua.

También afecta a la tensión de perforación (y, por lo tanto, a la rigidez dieléctrica), la forma de los electrodos, siendo esta tensión más baja con electrodos de punta y más elevada con electrodos esféricos, a igualdad de separación. Véase, por ejemplo, en la figura 93, los valores de la tensión de perforación en función de la separación entre electrodos, para un aceite mineral de calidad media, utilizando chispómetros de electrodos esfera-plano y punto-plano, respectivamente.

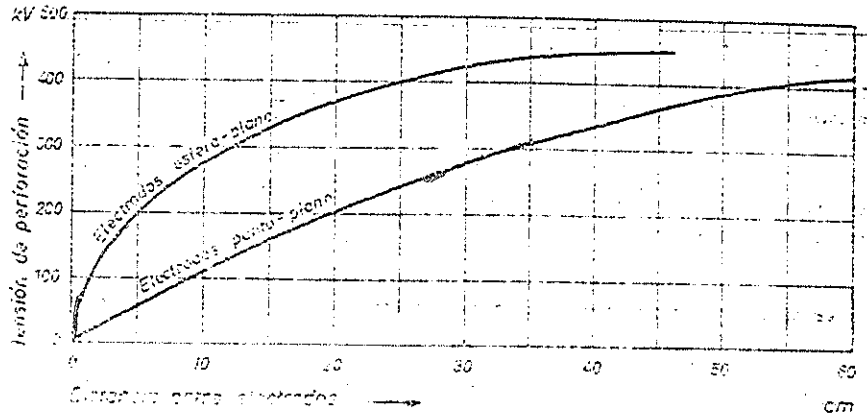


Fig. 93. — [illegible]

Aplicación de los aceites minerales como aislantes de cables

Los aceites minerales se emplean para impregnar las capas de papel aislante de los conductores eléctricos. Para esta aplicación específica, han de cumplir las siguientes condiciones:

a) Asegurar una fácil y completa impregnación sin producir burbujas de aire.

b) No contener ácidos, para evitar los efectos de corrosión metálica y la destrucción del papel.

c) Tener bajo coeficiente de dilatación, para reducir en lo posible la variación del volumen del aceite por efecto de los cambios de temperatura, que perjudicarían el papel aislante y producirían huecos que podrían ser causa de fenómenos locales de ionización.

d) Tener elevada resistividad eléctrica, y pérdidas dieléctricas que aumenten poco con el uso.

Es de especial importancia los efectos de los compuestos de azufre que, en los aceites aislantes empleados en cables de alta tensión, varían en una proporción de 1 a 1,5 %. La acción de estos compuestos sobre la resistencia de aislamiento de los cables no ha podido determinarse con exactitud, pero no parece tener importancia. No sucede lo mismo con las pérdidas dieléctricas, que aumentan según la constitución y proporción de estos compuestos. En lo que se refiere al poder oxidante del aceite, los compuestos de azufre actúan de cuerpos protectores.

Es preciso que el aceite aislante para cables esté completamente purificado, lo cual se consigue, generalmente, por medio de cuerpos absorbentes como el carbón activo, el caolín, etc. De esta forma, se obtiene una reducción que alcanza hasta un 30 % del contenido total de azufre; al mismo tiempo, la resistencia de aislamiento aumenta considerablemente. Otro procedimiento, mejor que el anterior, consiste en emplear como absorbente, el mercurio o alguno de sus compuestos, de esta forma, el contenido de azufre puede reducirse hasta un 50 %, mientras que la resistencia de aislamiento aumenta de 10 a 15 veces.

Aplicación de los aceites minerales como aislantes de interruptores

En esta aplicación específica, los aceites minerales, no solamente deben actuar de aislamiento entre las partes conductoras, sino también apagar rápidamente el arco de ruptura en el momento de la desconexión. Como este arco tiene una temperatura muy elevada, puede descomponerse el aceite, con formación de carbón y producción de sustancias gaseosas: el carbón ensucia las piezas y los contactos mientras que los gases pueden formar mezclas explosivas con el aire, con el consiguiente peligro de explosión.

De acuerdo con estas consideraciones, los aceites minerales que deban utilizarse como aislantes de interruptores, deben tener las siguientes propiedades:

a) Fluidez suficiente para que el funcionamiento del interruptor no tenga ningún fallo durante todas las épocas del año, ni aun a las temperaturas más bajas conocidas en la región donde esté instalado el aparato.
b) Gran resistencia a la formación del arco eléctrico.
c) Gran pureza, para evitar la formación de gases y de residuos carbonosos.

Aplicación de los aceites minerales como aislantes de transformadores

En su aplicación a los transformadores, los aceites minerales deben aislar los devanados entre sí y con la cuba del transformador, para evitar cualquier posibilidad de arco eléctrico y, al mismo tiempo, deben actuar como agentes refrigerantes del transformador evacuando las pérdidas caloríficas producidas en los devanados y en el hierro del transformador, por efecto Joule, por corrientes parásitas, etc. Por

estos conceptos, la elevación de temperatura en el aceite puede alcanzar hasta 50° C sobre la temperatura ambiente.

De acuerdo con estas condiciones de trabajo, los aceites minerales para transformador deben tener las siguientes características.

a) Viscosidad reducida, para permitir una fácil conducción del calor hacia las paredes exteriores de la cuba, en contacto con el aire ambiente. Debe tenerse en cuenta que un aceite es tanto más fluido cuanto más compuestos ligeros contiene, que se evaporan fácilmente; por lo tanto en un aceite demasiado fluido debe ir agregándose continuamente aceite nuevo, para compensar las pérdidas por evaporación.
b) Punto de congelación muy bajo, para que el aceite conserve su fluidez a todas las temperaturas, incluso las más bajas. Esta característica resulta especialmente importante en los transformadores que han de instalarse a la intemperie. La indicación del punto de congelación depende del clima de la región donde vaya a montarse el correspondiente transformador.
Al fijar las características generales de un aceite para transformador, debe tenerse en cuenta que existe una relación entre el punto de congelación y el de inflamación, ya que el último disminuye, a medida que baja el primero. Por esta razón resultaría absurdo pretender obtener para un mismo aceite un punto de congelación de − 50° C y un punto de inflamación superior a 180° C.
c) Rigidez dieléctrica suficiente para que los devanados queden suficientemente aislados entre sí, y con el hierro del transformador. El valor de la rigidez dieléctrica depende exclusivamente del estado de pureza física del aceite; como se ha dicho en un parágrafo anterior, disminuye en presencia de humedad y de impurezas sólidas que, además, absorben el agua y constituyen verdaderos "puentes" conductores en el seno del aceite aislante.

Aplicación de los aceites minerales como dieléctricos de condensadores

En los condensadores industriales se emplean, como armaduras metálicas, hojas de aluminio muy finas, separadas por hojas de papel impregnado con un aceite especial, ya que si se utilizara seco perdería rápidamente sus propiedades dieléctricas, a causa de su envejecimiento y por efecto de las variaciones de temperatura.

Estos aceites de impregnación deben estar perfectamente refinados y, después de la impregnación, han de tener la misma rigidez dieléctrica que antes.

La resistividad de los aceites de impregnación debe ser lo más elevada posible, reduciéndose bastante después de calentado, excepto si se toman precauciones especiales. Como dato informativo, se puede decir que si un buen aceite de impregnación se calienta durante 24 horas a 100° C, la pérdida de resistividad debe ser inferior a 5 % si el calentamiento se ha efectuado en vacío.

Dado su efecto sobre la capacidad, en este caso tiene gran importancia la constante dieléctrica. En los aceites minerales varía de 2,3 a 2,45; por otra parte, la constante dieléctrica del papel seco varía entre 2,1 a 2,7, y la del papel impregnado está comprendida entre 2,3 a 2,45, a temperatura normal y según su porosidad.

Deben tomarse ciertas precauciones con los aceites de condensadores. Particularmente, cuando el aceite ha pasado por varios ciclos de impregnación, el factor de pérdidas dieléctricas tiende a aumentar, a causa de oxidación. Por esta razón, el aceite debe tratarse adecuadamente, por procedimientos especiales.

Además de emplearse como agentes impregnantes, los aceites minerales pueden utilizarse también para el llenado de las cubas de los condensadores, garantizando, de esta forma el buen funcionamiento de éstos e impidiendo la entrada de humedad. Al contrario de lo que sucede con los transformadores, los aceites de relleno de los condensadores se alteran poco, ya que su calentamiento es de esa importancia. Por esta razón se podría emplear aceite de mediana calidad, pero en la practica se utiliza la misma clase de aceite empleada para la impregnación; frecuentemente, se aprovecha aceite ya empleado en varias impregnaciones que, por esta causa, está algo alterado y no se puede garantizar ya una impregnación perfecta.

Resumen de aplicaciones de los aceites minerales

Como resumen de los parágrafos anteriores, a continuación se expresan, en una tabla, las características de los aceites minerales en sus aplicaciones más importantes, es decir, como materiales de impregnación de cables, como agentes aislantes y extintores de interruptores, como agentes aislantes y refrigerantes de transformadores y como materiales de impregnación de condensadores.

TABLA 69. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ACEITES MINERALES AISLANTES

Características	Aceite para transformadores	Aceite para interruptores	Aceite para condensadores	Aceite para cables
Peso específico, en gr/cm³	0,88	—	0,91	0,90
Punto de inflamación, mínimo, en °C	130	180	149	280
Punto de combustión, mínimo, en °C	149	210	170	—
Punto de congelación, mínimo, en °C	— 15	— 5	— 15	—
Punto de fluidez, máximo, en °C	— 40	— 10	— 40	— 50
Rigidez dieléctrica, en kV/mm a 25 °C	30	30	30	25-30
Constante dieléctrica ε	2,2	2,2	2,2	2,25
Factor de pérdidas (tg δ), a 50 Hz y 100 °C	—	—	0,0025	—

Aceites minerales mezclados con resinas

En algunos cables con aislamiento de papel impregnado, como agente de impregnación se emplea una mezcla de aceite mineral con una resina natural (generalmente colofonia) en una proporción aproximada de 75 % de aceite y 25 % de resina. El contenido de ésta fija el curso del factor de pérdidas y la mezcla se elige de forma que dicho factor sea mínimo a la temperatura prevista de funcionamiento, sin que lleguen a producirse derrames de la masa aislante durante el montaje del cable.

Aceites sintéticos aislantes

Las investigaciones realizadas para obtener un líquido resistente a la oxidación y a la sedimentación y no inflamable (caso de transformadores) y, además, con elevada constante dieléctrica (caso de los

condensadores), han conducido al desarrollo de aislantes sintéticos a base de hidrocarburos clorados llamados, en general, *askareles* cuya composición exacta no es declarada por los fabricantes, pero que constituyen mezclas de diversos hidrocarburos clorados.

El hecho de la incombustibilidad de los askareles está en lo siguiente:

El aceite mineral se inflama cuando es descompuesto por el calor o por el arco eléctrico, ya que entre sus productos de descomposición está el hidrógeno que reacciona violentamente con el oxígeno atmosférico y esta reacción está acompañada de incendio y de explosión. Para suprimir cualquier riesgo de incendio, un dieléctrico líquido descompuesto por el calor o por el arco eléctrico no debe dar hidrógeno libre y, además, los gases de descomposición deben ser estables, incluso a temperaturas superiores a las que han provocado la descomposición: el ácido clorhídrico, constituido por combinación de cloro y de hidrógeno, responde perfectamente a esta condición; ya que la fórmula del ácido clorhídrico es ClH, se necesitará un átomo de cloro para saturar cada átomo de hidrógeno por lo que, teóricamente, el askarel deberá contener, por lo menos, tantos átomos de cloro como de hidrógeno; la experiencia demuestra, sin embargo, que aun cuando no se cumpla esta última condición, el askarel permanece prácticamente ininflamable.

La presencia de cierto contenido de ácido clorhídrico en los transformadores, no tiene demasiada importancia; pero no sucede lo mismo en los interruptores en que el contenido de ácido puede ser elevado, a causa del arco que siempre se origina durante las conexiones y desconexiones; por esta causa, los askareles están contraindicados para su empleo en interruptores.

En comparación con los aceites minerales aislantes, los askareles tienen las siguientes propiedades generales.

a) Una constante dieléctrica que es aproximadamente el doble de la de los aceites.
b) Una rigidez dieléctrica algo mayor.
c) Un factor de pérdidas dieléctricas algo más elevado.
d) Un precio más elevado.

Estas características, junto con su ininflamabilidad, a la que se ha hecho referencia anteriormente, determinan cuando es conveniente emplear askareles en lugar de aceites minerales, o viceversa; examinaremos esta cuestión con algún detalle.

En el caso de los transformadores, los askareles han permitido una reducción del tamaño y de las separaciones, debido a su mayor rigidez dieléctrica. Pero se ha hecho necesario modificar el aislamiento, debido a la acción disolvente de estos líquidos sobre las resinas que impregnan los aislamientos. Es decir, que los transformadores deben construirse especialmente para ser aislados con askareles.

En los condensadores se ha logrado una reducción superior a un 50 % en su volumen, en comparación con los condensadores aislados con aceite mineral, a causa de su mayor constante dieléctrica y de su rigidez dieléctrica más elevada.

Ya se ha indicado anteriormente que el empleo de askareles no es adecuado para el caso de interruptores, debido a la elevada concentración de ácido clorhídrico que se produce, como consecuencia de los continuos arcos eléctricos que se forman durante las operaciones de conexión y desconexión de los interruptores.

Finalmente, su precio, más elevado que el del aceite mineral, hace que sus buenas propiedades físicas y eléctricas solamente sean determinantes en aplicaciones en que resulte indispensable que el líquido aislante sea incombustible y antidetonante: salas de espectáculos, túneles, minas, etc.

La fabricación de askareles exige precauciones especiales, ya que los gases y vapores que se producen durante esta fabricación, son nocivos para la salud humana.

Los askareles reciben distintos nombres comerciales, según los países y firmas fabricantes, podemos citar los siguientes: *Asbestol, Afcolina, Clophen, Chlorextol, Inerteen, Pyralene, Pyranol.*

Para que nuestros lectores tengan noticia más detallada de estos líquidos sintéticos aislantes, a continuación se estudian las propiedades y campos de aplicación del *Pyralene* fabricado por la firma francesa PRODELEC.

Estudio de un aceite sintético aislante: el Pyralene

Existen varios tipos de *Pyralene* con distinta composición química, según la aplicación prevista: todos ellos son derivados clorados de hidrocarburos aromáticos del tipo benceno. Según las aplicaciones particulares, son definidos más o menos clorados con, eventualmente, selección de isómeros particulares o de mezclas de estos mismos difenilos clorados con clorobencenos. De esta forma, es posible obtener toda una gama de productos que responden a las condiciones de utilización de la industria eléctrica, en lo que se refiere a viscosidad, punto de congelación, pérdidas por evaporación, etc. Además, estos productos se someten a una purificación especial para conseguir las características dieléctricas indispensables al aislamiento de los aparatos eléctricos.

Las propiedades más importantes de estos líquidos, son las siguientes:

Propiedades físicas:

Los *Pyralene* se presentan bajo la forma de líquidos, más o menos viscosos, incoloros y perfectamente limpios.

Su densidad, más elevada que la de los aceites minerales, varía entre 1,27 y 1,55, a 100° C.

Su viscosidad está comprendida entre 1 y 48 centistokes, a 100° C.

Su punto de congelación está comprendido entre −51° C y +30° C.

Sus pérdidas por evaporación son desdeñables.

Está garantizada por los fabricantes la ininflamabilidad de estos productos.

Propiedades químicas:

Desde el punto de vista químico, los *Pyralene* son neutros ya que tienen un grado de acidez inferior a 0,01 mg de KOH por gramo de *Pyralene*. Además, son químicamente estables.

Los *Pyralene* disuelven o descomponen algunos de los materiales utilizados en la construcción eléctrica, debe consultarse con los fabricantes antes del eventual empleo de estos productos, para obtener una garantía en la selección de materiales utilizados, tanto si se trata de aislantes sólidos como si se trata de barnices, resinas, lacas, juntas, etcétera.

Bajo la acción del arco eléctrico, el *Pyralene* se descompone en cierto número de gases, que comprende principalmente el ácido clorhídrico (en 9% %). Sin embargo, los ensayos no han detectado ningún gas nocivo, como el cloro o el fosgeno.

Propiedades eléctricas:

Las propiedades eléctricas de los *Pyralene* están condicionadas por el hecho de que son productos polares viscosos de estructura vítrea. En condiciones normales de utilización, su constante dieléctrica es muy elevada (más del doble de los aceites minerales), mientras que sus pérdidas dieléctricas, aunque pequeñas, resultan ligeramente superiores a las de los aceites minerales.

Si se hace variar la temperatura de un *Pyralene*, desde un valor muy bajo, en el que está prácticamente solidificado, hasta temperaturas suficientemente elevadas para que esté bien fluido, se obtienen, para la constante dieléctrica y el factor de pérdidas, los valores esquematizados en la figura 94. Para bajas temperaturas, cuando el dieléctrico está completamente solidificado, las pérdidas dieléctricas son muy pequeñas, la constante dieléctrica también es pequeña a consecuencia de la inmovilización de los dipolos. El calentamiento

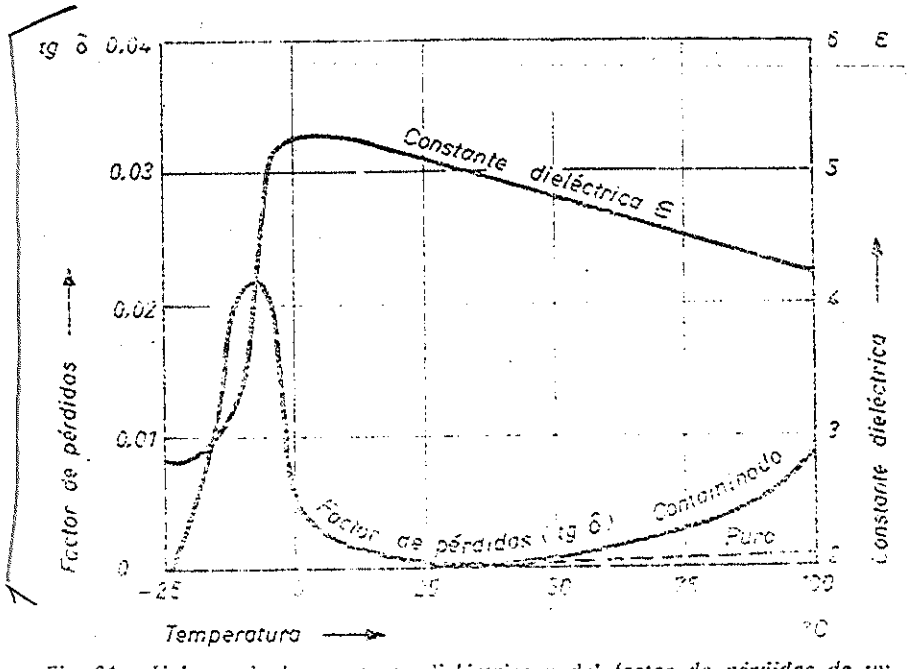
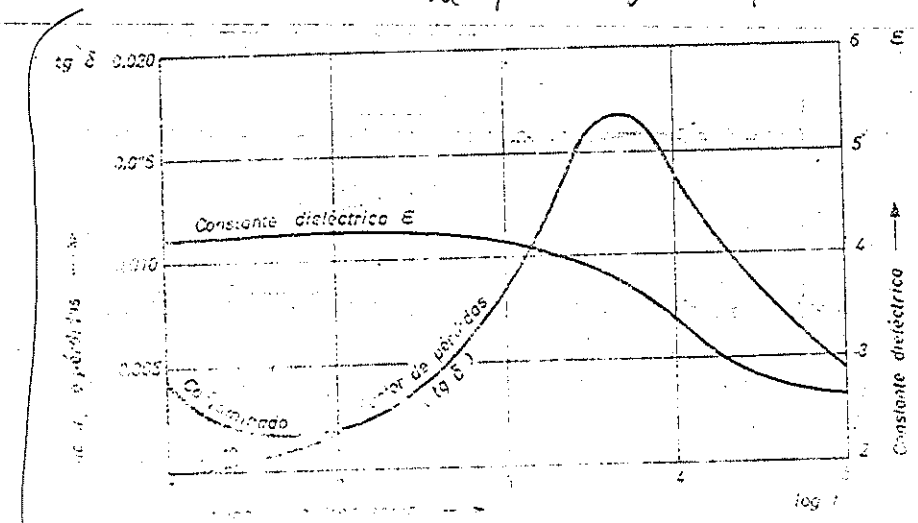


Fig. 94.—Valores de la constante dieléctrica y del factor de pérdidas de un Pyralene, en función de la temperatura.

libera progresivamente los dipolos por descongelación; lo que tiene como consecuencia, una progresiva elevación de la constante dieléctrica; al mismo tiempo, crecen las pérdidas dieléctricas a consecuencia de la fricción provocada por la viscosidad del medio. Después de pasar por un máximo, las pérdidas dieléctricas decrecen y llegan a un valor mínimo, mientras que la constante dieléctrica cesa de crecer. Si se continúa el calentamiento del *Pyralene*, su constante dieléctrica, después de haber pasado por un máximo, decrece lentamente a consecuencia de la dilatación y de la agitación térmica creciente. Por el contrario, las pérdidas dieléctricas son cada vez más elevadas, a causa de la presencia de pequeñas cantidades de impurezas ionizadas que el líquido ha podido disolver.

Si se somete un *Pyralene* a una frecuencia variable, a temperatura constante tal que el líquido no esté solidificado se obtienen, para constante dieléctrica y las pérdidas dieléctricas, los valores representados en la figura 95. Nótese que el resultado es análo al observado por variación de la temperatura. 94) elevación de la frecuencia tiene el mismo efecto q de la temperatura.

en función de la frecuencia



... del ... del factor de pérdidas de un ... en función de la frecuencia.

... las pérdidas eléctricas y la constante dieléctrica de los *Pyralene* están influenciadas por la variación de la tensión aplicada, ... por la duración del tiempo de funcionamiento, por lo menos dentro de los valores normalmente presentes en aplicaciones industriales.

Para determinar la resistividad en corriente continua, de los *Pyralene*, se aplica al condensador que los contiene, una tensión dada (generalmente, 200 V/mm), observando el valor obtenido al cabo de cierto tiempo, generalmente un minuto. La resistividad está directamente influenciada por la presencia de impurezas ionizables y es tanto más elevada cuanto más puro es el producto. También depende de la viscosidad del líquido, ya que ésta se opone al desplazamiento de los iones hacia los electrodos. Las variaciones de temperatura también influyen en el valor de la resistividad, principalmente por las variaciones de viscosidad del medio que provocan. La tensión y la duración de su aplicación tienen una importante influencia: los iones se desplazan tanto más rápidamente cuanto mayor es la tensión, y la corriente decrece con el tiempo a consecuencia del empobrecimiento de iones libres en el seno del líquido. De esta forma, el valor de la resistividad, depende de numerosos parámetros entre los que algunos (tensión aplicada y duración) son arbitrarios; por esta causa, solamente tiene un valor orientativo y es necesario que todos los parámetros queden bien precisados, pues los valores de la resistividad varían mucho según las condiciones en que se haya realizado su medida.

La rigidez dieléctrica de los *Pyralene* es normalmente muy elevada (unos 200 kV/cm) y se mantiene generalmente a este valor aunque estén contaminados por impurezas solubles; sin embargo, disminuye con la presencia de impurezas en suspensión. Prácticamente, su valor no está modificado por la presencia de humedad, mientras el agua permanezca disuelta, pero decrece cuando el agua se separa en forma de niebla o de gotitas.

Propiedades fisiológicas:

En las condiciones normales de empleo, los *Pyralene* pueden manipularse sin ningún riesgo de efecto tóxico. Sin embargo los fabricantes recomiendan las siguientes medidas de precaución:

a) prever una ventilación o, mejor aún, una aspiración de los vapores en el momento de abrir las autoclaves de impregnación y de dejarlas enfriarse hasta 50-60° C, para evitar un desprendimiento demasiado abundante de vapores, cuyo respiración es desagradable y puede tener un efecto irritante sobre las mucosas.

b) evitar proyecciones de *Pyralene* caliente sobre la piel, que podrían provocar cierta irritación cutánea a las personas particularmente sensibles. Esta irritación desaparece por enjabonado o por fricción con glicerina.

Condiciones de utilización de los Pyralene:

La elección del tipo de Pyralene debe hacerse en función de la aplicación prevista. Por ejemplo, en el *Pyralene 1476*, cuyo punto de congelación es + 12° C, la constante dieléctrica decrece por debajo de 0° C y el valor máximo de las pérdidas dieléctricas se sitúa alrededor de − 6° C. Por lo tanto, no es apropiado para una aplicación a baja temperatura: para ello, debe elegirse un *Pyralene* más fluido.

En la tabla de la página siguiente, se resumen las características más interesantes de los *Pyralene* y sus principales dominios de aplicación.

Aplicaciones a los transformadores:

El empleo de los *Pyralene* a los transformadores conduce a las siguientes ventajas:

a) Seguridad. Los *Pyralene* son ininflamables y sus vapores no son explosivos. Por estas razones, resulta recomendable su empleo en los transformadores de minas, inmuebles, salas de espectáculos,

TABLA 70. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEITES "PYRALENE"

Características	Pyralene 1466	Pyralene 1500 S	Pyralene 1476	Pyralene 1411	Pyralene 1476	Pyralene 1442	Pyralene 1467	Pyralene 1470
Peso específico a 20 °C, en gr/cm³	1,41	1,31	1,35	[illegible]	1,53	1,44	1,56	1,54
Peso específico a 100 °C, en gr/cm³	1,31	1,27	[illegible]	[illegible]	1,49	1,36	1,48	1,46
Punto de congelación, en °C	— 51	— 26	— 21	[illegible]	— 12	— 30	— 31	— 45
Viscosidad a 20 °C, en centistokes	23	32	30	[illegible]	[illegible]	[illegible]	21	11,2
Viscosidad a 100 °C, en centistokes	1,2	2	2,1	[illegible]	[illegible]	16	1,7	1,4
Punto de inflamación, en °C	130	171	170	[illegible]	13	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Punto de combustión, en °C	Incombustible	Incombustible	Incombustible	Incombustible	Inflamable	Inflamable	Inflamable	Inflamable
Grado de acidez, en mg KOH/gr	0,01 máx	0,01 máx	0,01 máx	0,01 máx	Incombustible	Incombustible	Incombustible	Incombustible
Contenido de cloro libre, en %	0,00001 máx	0,00001 máx	0,00001 máx	0,00001 máx	0,01 máx	0,01 máx	0,01 máx	0,01 máx
Constante dieléctrica a 20 °C	5,9	6	6,4	[illegible]	5,1	4,3	4,6	5
Constante dieléctrica a 100 °C	4,8	4,9	5,2	[illegible]	4,3	3,8	3,9	4,3
Factor de pérdidas (tg δ) a 100 °C y 50 Hz	0,03 máx	0,02 máx	0,02 máx	0,02 máx	0,01 máx	0,01 máx	0,03 máx	0,03 máx
Resistividad en ohmio-cm, en Hz a 100 °C	10^{13} mín	10^{13} mín	10^{13} mín	10^{13} mín	10^{13} mín	10^{13} mín	10^{13} mín	10^{13} mín
Rigidez dieléctrica, en kV/cm	200	200	200	200	200	200	200	200
Principales aplicaciones	Condensadores Transformadores	Condensadores	Condensadores	Condensadores	Condensadores Cables	Condensadores Cables	Transformadores	Transformadores

subestaciones subterránea, metros, navíos, locomotoras y en todos aquellos casos en que no se puede aceptar el menor riesgo de incendio.

b) Economía de instalación. De la seguridad anteriormente citada, resulta una economía de espacio, de material y de tiempo de instalación; muchas veces, también de precio.

En lo que se refiere a economía de espacio, los transformadores aislados con *Pyralene* pueden instalarse en emplazamientos normalmente inutilizables (subsuelo, techo, etc.).

En lo que se refiere a economía de material, el empleo de *Pyralene* permite la supresión de las celdas antifuego o de pantallas de cemento necesarias para la instalación de transformadores aislados con aceite mineral; también se suprimen los dispositivos de seguridad contra incendios y la cuba de evacuación de aceite.

En lo que se refiere al precio de instalación, los transformadores aislados con *Pyralene* resultan indispensables en la distribución repartida en los talleres que tiende a sustituir a la distribución centralizada por una subestación única; el hecho de poder instalar los transformadores en el centro de utilización de la corriente eléctrica, permite una notable economía sobre los cables de baja tensión y, teniendo en cuenta esta economía, más los correspondientes trabajos de construcción de obra, pueden resultar, en algunos casos, economías totales del 40 % respecto a los transformadores centralizados y aislados con aceite mineral, a pesar del mayor precio inicial de los transformadores aislados con *Pyralene*.

c) Economía de explotación. En primer lugar, la facilidad de disponer la alta tensión en el lugar de utilización reduce las pérdidas en las líneas. Por otra parte, resulta una economía en el mantenimiento de los transformadores, ya que la excelente estabilidad química de los *Pyralene* permite evitar los periódicos tratamientos de regeneración, que resultan necesarios con los aceites minerales.

Aplicaciones a los condensadores:

En este campo, los *Pyralene* presentan extraordinarias ventajas, entre las que se pueden citar:

a) Reducción de volumen, que puede alcanzar 50 % del correspondiente a los condensadores con aceite mineral. La elevada constante dieléctrica de los *Pyralene* (de 2 a 3 veces la del aceite mineral) da al complejo papel + impregnante una constante dieléctrica de 30 a 40 % mayor que la obtenida con aceite mine-

ral. Además, se consigue un mejor reparto del campo electrostático, ya que las constantes dieléctricas del papel y del *Pyralene* son casi iguales, lo que, añadido a la elevada rigidez dieléctrica de los *Pyralene*, permite aumentar las tensiones de servicio, sin reducir la seguridad de funcionamiento de los condensadores.
Reducción de precio, consecuencia de la anterior, que permite disminuir los pesos de materias primas, particularmente papeles y hojas de aluminio, reduciendo también la mano de obra.
Aumento de la duración de vida, a consecuencia de

— una mejor resistencia a la ionización;
— ausencia de envejecimiento, debida a la estabilidad química de los *Pyralene;*
— supresión de cualquier riesgo de formación de cera;
— mejor resistencia del papel al envejecimiento si está impregnado con *Pyralene* que si lo está con aceite mineral.

(d) Ininflamabilidad, lo que significa también seguridad de servicio.
Como existen diversos tipos de *Pyralene*, siempre es posible disponer de un aislante perfectamente adaptado a las diversas clases de condensadores:

— mejora del factor de potencia
— tubos fluorescentes
— arranque de motores
— generadores de choque
— emisores de radiofrecuencia
— hornos de inducción
— y otras aplicaciones.

Aplicaciones a los cables:

Los *Pyralene* tipos 1476 y 1482, que son los más viscosos (véase tabla anterior) constituyen excelentes coplastificantes para los cables aislados con policloruro de vinilo, aportando:

— mejor resistencia a la llama
— mejora muy sensible de las propiedades aislantes que, por lo general, quedan fuertemente rebajadas por la adición de otros plastificantes.

Otras aplicaciones:

Los distintos tipos de *Pyralene* pueden emplearse también como

líquidos dieléctricos en otras aplicaciones, entre las que cabe destacar:

— los rectificadores, particularmente los complejos transformadores-rectificadores para separadores electrostáticos de polvo
— los transformadores de medida
— los reguladores de tensión
— las bobinas de inducción
— los reóstatos
— los juegos de barras.

Fluidos y aceites de silicona

Los fluidos y aceites de silicona se utilizan como aislantes líquidos y tienen muy buenas propiedades térmicas, químicas y eléctricas. Estos materiales se estudian con detalle en el capítulo "Siliconas empleadas en Electrotecnia" de este mismo volumen, y al que remitimos al lector interesado en este tema.

Tetracloruro de carbono

El *tetracloruro de carbono* es un líquido no inflamable, con un punto de ebullición de aproximadamente 75° C y un punto de congelación de unos — 23° C. Como líquido aislante, puede considerarse como de resultados satisfactorios pero, debido a su bajo punto de ebullición y a los efectos fisiológicos de su vapor no se ha empleado hasta ahora en grandes cantidades, con este objeto. Sin embargo, en lo que respecta a su incombustibilidad, es notablemente superior a los aceites minerales.

El tetracloruro de carbono tiene una acción detergente, aunque ligeramente corrosiva, sobre la mayor parte de los metales y, por consiguiente, debe mezclarse con otros líquidos para neutralizar esta acción.

Industrialmente, se emplea en gran escala en la preparación de líquidos extintores para centrales y subestaciones eléctricas. Como extintor vaporiza sobre la llama una nube densa de gas no combustible, principalmente de anhidrido carbónico, y de esta forma se llega a sofocar el fuego. Es muy útil disponer de este líquido junto a los aparatos y dispositivos eléctricos ya que no es conductor y sus vapores no atacan a los aislantes; en caso de incendio puede utilizarse para sofocar el fuego aunque los aparatos estén en servicio.

Se emplea también como extintor del arco eléctrico en los fusibles de alta tensión, en interruptores y en pararrayos.

Agua pura

El *agua pura* es un excelente dieléctrico, siempre que esté totalmente exenta de sales metálicas ya que, en caso contrario, pierde rápidamente sus propiedades aislantes, para convertirse en líquido conductor. Este peligro, y las dificultades para fabricar y conservar un agua químicamente pura, han limitado hasta ahora su empleo como líquido aislante.

Sin embargo, creemos interesante dar a conocer las principales propiedades eléctricas del agua químicamente pura.

La constante dieléctrica del agua, se expresa por la siguiente fórmula.

$$\varepsilon = 80 - 0{,}4\ (t - 20)$$

t = temperatura en °C.

Por ejemplo para el agua a 50° C la constante dieléctrica vale

$$\varepsilon = 80 - 0{,}4\ (50 - 20) = 68$$

Esta fórmula es aplicable para temperaturas entre 0° y 100° C y frecuencias hasta 100 MHz y a la presión atmosférica.

La constante dieléctrica del hielo a 0° C es prácticamente la misma que la del agua, pero disminuye rápidamente al bajar la temperatura (por debajo de 0° C), y al aumentar la frecuencia; a 100 kHz, es del orden de $\varepsilon = 2$ a 4, pero con poca influencia de la temperatura.

La conductividad aumenta con la temperatura, de acuerdo con los siguientes valores:

Agua a − 15° C ⟶ $1{,}6 \times 10^{-9}$ siemens/cm
Agua a 20° C ⟶ 4×10^{-8} siemens/cm
Agua a 50° C ⟶ $1{,}7 \times 10^{-7}$ siemens/cm

Para determinar la rigidez dieléctrica, se han realizado ensayos entre esferas de bronce de 2,54 cm de diámetro, sumergidas en un globo lleno de agua, de 15 cm de diámetro, con una onda de 500 kHz aplicada durante 1 microsegundo; se obtuvo una tensión de perforación de 149 kV para una distancia intereléctródica de 1 cm (para el aire, la tensión de perforación, en las mismas condiciones, es de 33 kV) siendo la resistencia del agua de 20 000 ohmios. Utilizando electrodos de puntas sobre varillas de 0,31 cm y con la misma separación, se encontró para el agua una tensión de perforación de 56,5 kV (para el aire, en las mismas condiciones, 25 kV) con una

resistencia del agua de 40 000 ohmios. La descarga provocada en estas condiciones no va acompañada de aumento de temperatura: se trata realmente de una perforación eléctrica del agua.

El agua químicamente pura se ha empleado como agente de extinción del arco eléctrico en los denominados "disyuntores de expansión", y para extinguir incendios en equipos de alta tensión. Sin embargo, y debido a sus excelentes propiedades dieléctricas y a su baratura, se intenta ampliar su campo de aplicación sin que, hasta el presente, se haya conseguido este propósito por la dificultad, anteriormente indicada, de obtener agua químicamente pura, ya que la menor traza de sales metálicas, tan comunes en el agua ordinaria, hace perder rápidamente al agua sus propiedades dieléctricas.

15 Materiales aislantes gaseosos

Propiedades eléctricas de los gases

Un gas en estado normal, es decir, no expuesto a ningún agente ionizante es un material aislante perfecto para todas las tensiones de servicio que estén por debajo de su rigidez dieléctrica.

Por diversas circunstancias, los gases pueden pasar de su *estado dieléctrico* a su *estado de conducción*, es decir, que se vuelven conductores. Entre estas circunstancias, se pueden citar:

a) La proximidad de la llamas, de los arcos eléctricos, de carbón o de metales incandescentes.
b) La difusión en un espacio en que se produce o se ha producido recientemente, una descarga eléctrica.
c) Al atravesar un espacio bajo la influencia de rayos X, de rayos catódicos, de radiaciones radiactivas o de luz ultravioleta de longitud de onda muy corta.

Todas estas causas producen en los gases un estado llamado *ionización*, o de existencia de iones libres mezclados con el gas, que provocan la conductividad eléctrica de éste. La conducción eléctrica en un gas ionizado que aparentemente no sigue la Ley de Ohm, excepto si la fuerza electromotriz que actúa sobre el gas es muy pequeña. En la figura 96 se muestra la curva tensión corriente de un gas ionizado, entre electrodos de armaduras paralelas. A bajas tensiones, en la región de la curva comprendida entre 0 y 1, el gas actúa como cualquier otro conductor que siga la Ley de Ohm; en la región compren-

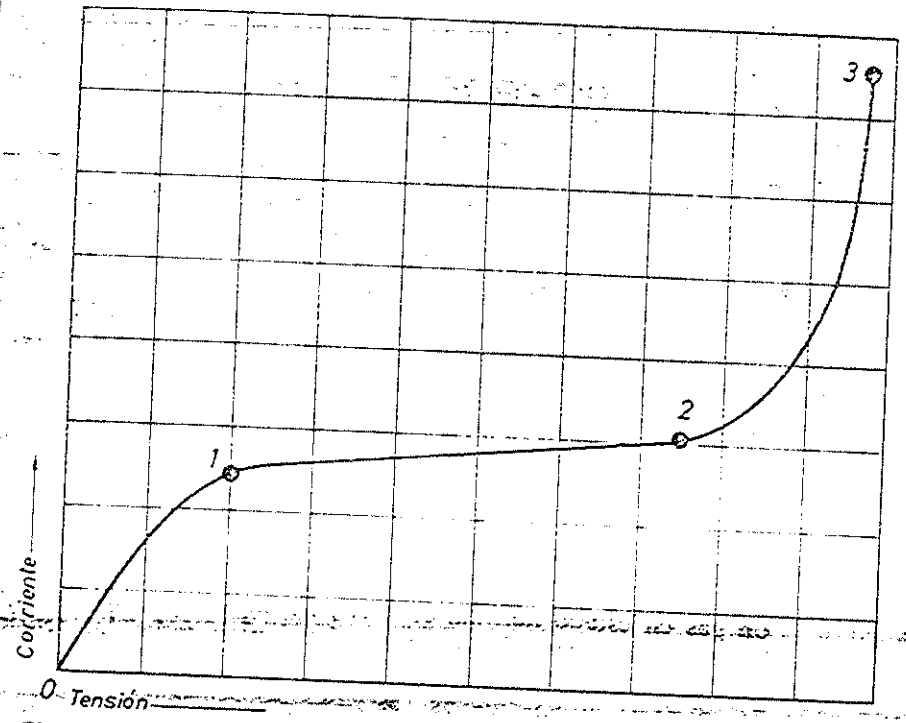


Fig. 96.—Curva tensión-corriente de un gas ionizado, entre electrodos planos y paralelos.

dida entre 1 y 2, existe un estado de saturación y un aumento de corriente muy pequeño con el aumento de tensión; finalmente, en la región comprendida entre 2 y 3, el campo eléctrico del gas se hace lo suficientemente elevado para provocar por sí mismo la ionización y en esta región, el aumento de corriente es mucho mayor que el correspondiente aumento de tensión.

Cuando cesa la acción del agente ionizante, el gas sigue manteniendo su conductividad eléctrica durante cierto tiempo y finalmente, desaparece completamente. Esto indica que los iones libres presentes en el seno del gas, se recombinan entre sí y, al terminarse este proceso, el gas vuelve a su estado normal. También puede acelerarse la eliminación de la conductividad, haciendo pasar al gas a través de lana de vidrio o haciéndolo burbujear en una masa de agua u obligándole a que atraviese un campo eléctrico muy intenso.

Constante dieléctrica de los gases

La constante dieléctrica de todos los gases (aire, hidrógeno, nitrógeno, anhídrido carbónico, etc.) a las temperaturas comprendidas entre 0 y 20° C y la del vapor de agua a la temperatura de 150° C, es aproximadamente igual a la unidad.

El valor de la constante dieléctrica es prácticamente independiente de la frecuencia, de la intensidad del campo eléctrico y de los campos magnéticos, pero está afectada, aunque ligeramente por los cambios de presión y de temperatura.

Para todos los efectos técnicos y, en condiciones normales de presión y de temperatura, la constante dieléctrica de la mayor parte de los gases puede considerarse igual a la unidad, aunque cuando se expresan en función del vacío absoluto, cuya constante dieléctrica es la unidad, tienen un valor ligeramente superior a uno. En la tabla que sigue a continuación, se expresa las constantes dieléctricas de algunos gases utilizados en Electrotecnia como aislantes, y en las condiciones de presión y de temperaturas indicadas en la tabla 71.

El estado de ionización de un gas influye en su constante dieléctrica: para presiones muy débiles, dicha constante disminuye al principio, cuando comienza la ionización, para crecer bruscamente, al aumentar más la ionización.

La presencia de humedad en el aire y otros gases aumenta su constante dieléctrica.

Descarga eléctrica en los gases

Cuando se aplica una tensión creciente entre dos electrodos sumergidos en el seno de un gas, llega un momento en que se produce una *descarga eléctrica* entre ambos electrodos. Esta descarga puede producirse de varias formas diferentes:

Efecto corona: a partir de cierto valor de la tensión, se produce una descarga oscura en el espacio interelectródico pero ligeramente luminosa en las proximidades del electrodo positivo (ánodo) que se denomina *efecto corona*. Este tipo de descarga es perjudicial porque ocasiona interferencias de radiofrecuencia y produce ozono si hay presencia de oxígeno.

Efluvio: si se sigue aumentando la tensión, se produce el *efluvio*; la luminosidad anódica alcanza al cátodo y el espacio interelectródico queda iluminado con una tonalidad violeta uniforme. Cualquiera que sea la forma de los electrodos, se produce en sus proximidades una zona de ionización; el efluvio aparece cuando hay saturación en dicha zona.

TABLA 71. CONSTANTE DIELÉCTRICA DE LOS GASES

Gas	Presión atmósferas	Temperatura °C	Constante dieléctrica ε
Acido clorhídrico (ClH)	1	100	1,00258
Aire	1	0	1,000588
Aire	20	11	1,0101
Aire	40	11	1,0196
Aire	60	11	1,0294
Aire	80	11	1,0387
Aire	100	11	1,0482
Aire	120	11	1,0579
Aire	140	11	1,0674
Aire	160	11	1,0760
Aire	180	11	1,0845
Aire	20	19	1,0108
Aire	40	19	1,0218
Aire	60	19	1,0330
Aire	80	19	1,0439
Aire	100	19	1,0548
Argón	1	23	1,000530
Amoníaco (NH_3)	1	20	1,00718
Anhídrido carbónico (CO_2)	1	0	1,000966
Anhídrido carbónico (CO_2)	10	15	1,008
Anhídrido carbónico (CO_2)	20	15	1,020
Anhídrido carbónico (CO_2)	40	15	1,060
Anhídrido sulfuroso (SO_2)	1	0	1,00993
Bisulfuro de carbono (CS_2)	1	0	1,00290
Etileno (C_2H_4)	1	0	1,00138
Hidrógeno (H_2)	1	0	1,000264
Metano (CH_4)	1	0	1,000948
Nitrógeno (N_2)	1	0	1,00061
Oxido de carbono (CO)	1	0	1,000692
Oxido nitroso (N_2O)	1	0	1,00108
Oxido nitroso (N_2O)	10	15	1,010
Oxido nitroso (N_2O)	20	15	1,025
Oxido nitroso (N_2O)	40	15	1,070
Oxígeno (O_2)	1	0	1,00055
Vapor de agua (H_2O)	4	145	1,00705

Chispa: descarga de corta duración, a semejanza de una línea quebrada, con ángulos muy marcados; puede ser de tono violeta y poco brillante, con transporte de poca energía o de tono blanco azulado, muy luminoso, produciéndose entonces chasquidos y detonaciones y que corresponde a un transporte de gran energía.

Arco: descarga de larga duración, de forma casi rectilínea, muy caliente y constituido principalmente por vapores incandescentes producidos por las partículas metálicas o de carbón, procedentes de los electrodos; este último fenómeno es continuo y persistente, pero requiere un cátodo muy caliente.

Muchas veces, es difícil establecer una diferencia clara entre estas formas de descarga porque cualquiera de ellas puede provocar otro tipo de descarga, como sucede cuando a una chispa le sucede inmediatamente un arco, o cuando el efecto corona es sucedido inmediatamente por una chispa, sin descarga de efluvio intermedia.

Ley de Paschen

Para cualquier distancia dada entre electrodos en atmósfera gaseosa, existe cierta presión crítica a la cual, la descarga disruptiva se produce con un valor mínimo de la tensión aplicada entre los electrodos. Por ejemplo, para el caso del aire y con una tensión aplicada de 340 V, se produce la descarga a una presión de 1,5 mm, con una distancia entre electrodos de 3 mm; para la misma tensión aplicada, la descarga se produce a una presión de 5 mm, si la distancia entre electrodos es de 1 mm. Con presiones por encima o por debajo de estos valores críticos aumenta la tensión necesaria para producir la ruptura del gas, tanto al aumentar como al disminuir las presiones.

Estos resultados están resumidos en la *Ley de Paschen*, la cual establece que la tensión disruptuva de un gas, solamente es función del producto de la distancia entre electrodos por la presión del gas, es decir

$$U_d = f\ (pd)$$

p = presión del gas
d = distancia entre electrodos

o, dicho de otra forma, que la tensión disruptiva de un gas solamente depende de la masa de gas entre electrodos.

Si la presión p y la distancia d, varían de forma que se tenga

$$pd = constante$$

de acuerdo con lo dicho anteriormente, la tensión disruptiva permanecerá también constante. Esta relación será también aplicable para la tensión mínima disruptiva, a la presión crítica.

A continuación, se expresan en una tabla los valores de las tensiones mínimas disruptivas y del producto *pd*, para algunos gases utilizados en Electrotecnia.

TABLA 72. TENSIONES DISRUPTIVAS MÍNIMAS DE LOS GASES

Gas	Potencial disruptivo mínimo V	Producto pd p en mm de agua d en mm
Aire	341	5,7
Anhídrido carbónico	419	5,1
Argón	233	7,6
Helio	261	27
Hidrógeno	278	14,4
Nitrógeno	251	6,7

Veamos una aplicación práctica de la tabla anterior. El nitrógeno tiene una tensión disruptiva mínima de 251 V y un producto

$$pd = 6{,}7$$

Esto quiere decir que se producirá la chispa disruptiva en la siguiente serie de condiciones:

Para $p = 1$ mm y $d = 6{,}7$ mm
Para $p = 1{,}5$ mm y $d = 4{,}47$ mm
Para $p = 2$ mm y $d = 3{,}35$ mm
Para $p = 2{,}5$ mm y $d = 2{,}68$ mm
etc., etc., etc.

ya que en todos los casos citados se cumple la condición

$$pd = 6{,}7$$

Nótese que cuanto mayor es la presión, menor puede ser la distancia entre electrodos para que se produzca la descarga disruptiva. Es decir, que los gases comprimidos son mejores aislantes que en las condiciones normales de presión.

Recordaremos para terminar que, en lo que respecta a unidades de presión

$$1 \text{ mm de agua} = 1 \text{ gr/mm}^2 = 9{,}8 \times 10^{-2} \text{ atmósferas}$$

Rigidez dieléctrica de los gases

La *rigidez dieléctrica* de los gases está determinada, ante todo, por las condiciones geométricas y la separación de los electrodos. También depende de la naturaleza y pureza del gas, de su densidad y, en menor grado, del material que constituye el electrodo.

Hemos visto en el parágrafo anterior la influencia combinada de la presión del gas y de la distancia entre electrodos, sobre el valor de la tensión disruptiva y también, por lo tanto, sobre el valor de la rigidez dieléctrica. Esta influencia está determinada por la Ley de Paschen, anteriormente citada, pero esta Ley solamente es aplicable para campos eléctricos uniformes, es decir, no sometidos a la acción de la ionización parcial o total de los gases. Es muy difícil determinar el valor de la rigidez dieléctrica en estos campos eléctricos no uniformes, por lo que se ha debido recurrir a resultados experimentales.

Es muy interesante considerar la *rigidez dieléctrica relativa*, es decir, tomando como unidad la rigidez dieléctrica de un gas (generalmente, el aire) en determinadas condiciones de temperatura y presión y comparándola con la de otros gases. De esta forma, en

TABLA 73. RIGIDEZ DIELÉCTRICA RELATIVA DE LOS GASES

Presión atmósferas	Aire	Anhídrido carbónico	Hidrógeno	Nitrógeno	Oxígeno
1	1	1,20	0,87	1,16	0,95
2	1	1,10	0,76	1,15	0,93
3	1	1,05	0,7[illegible]	1,15	0,92
4	1	1,03	0,69	1,14	0,92
5	1	1,02	0,68	1,14	0,90

la tabla 73 se han expuesto los valores de la rigidez dieléctrica de varios gases respecto de la del aire, a diferentes presiones.

Téngase en cuenta que en la tabla anterior se toma la rigidez dieléctrica del aire como unidad a cada presión, pero en magnitud real, la rigidez dieléctrica crece proporcionalmente con la presión.

Según los datos de la tabla anterior, el nitrógeno seco es el mejor dieléctrico gaseoso.

La rigidez dieléctrica de los gases está sujeta a grandes cambios con las impurezas. A bajas presiones, un 0,1 % de argón en el gas neón, reduce la rigidez dieléctrica de éste en un 75 %. Por el contrario, a la presión atmosférica, la adición de pequeñas cantidades de vapor de tetracloruro de carbono o de cloroformo, aumenta la rigidez dieléctrica de los gases hasta un 50 %.

El aire como dieléctrico

El aire es, sin duda, el material aislante más empleado y, también,

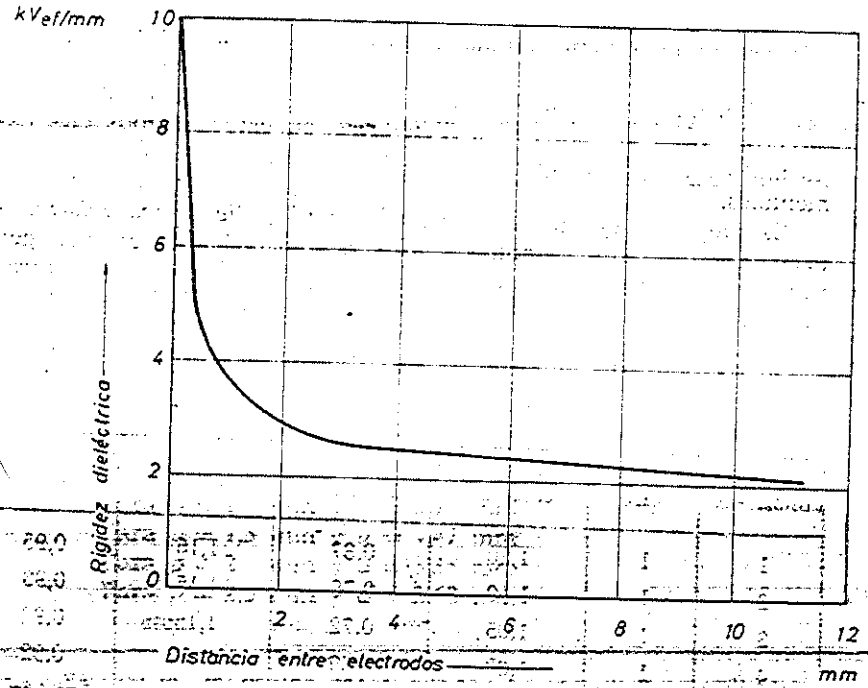


Fig. 97.—Variación de la rigidez dieléctrica del aire, en función de la distancia entre electrodos.

el más económico. Parece conveniente, por lo tanto, estudiar con algún detalle las características dieléctricas del aire.

En un campo eléctrico uniforme y con aire a la densidad normal (presión barométrica de 1 atmósfera y a 25° C de temperatura), la rigidez dieléctrica es de 31 kV (valor de cresta) por cm, o de 21,9 kV (valor eficaz) por cm, a las frecuencias industriales de corriente alterna. Los valores citados representan la rigidez dieléctrica cuando no está limitado el tiempo de aplicación de la tensión. La rigidez dieléctrica está afectada por la forma, dimensiones y separación entre los electrodos, según se expresa en la figura 97. También influyen en el valor de la rigidez dieléctrica, la temperatura del aire y la presión a que está sometido (Fig. 98).

Dentro de ciertos límites, la rigidez dieléctrica del aire también está influida por la densidad. Recordemos que la densidad del aire, como las de los demás gases, varía en razón directa con la presión y en razón inversa con la temperatura absoluta; los valores normales que se toman como referencia son: presión barométrica, 760 mm de mercurio = 1 atmósfera, y temperatura de 25° C. La densidad

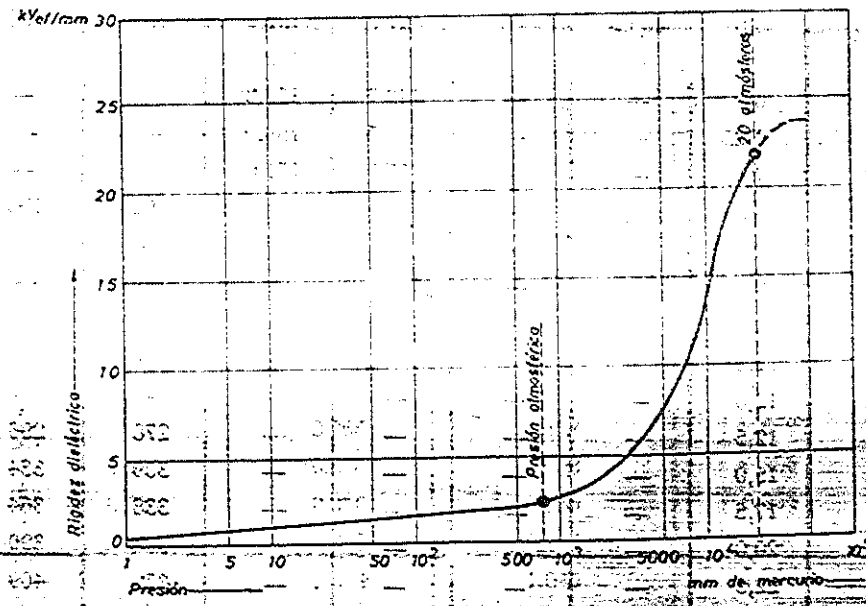


Fig. 98.—Variación de la rigidez dieléctrica del aire, en función de la presión.

TABLA 74. TENSIONES DISRUPTIVAS PARA EL AIRE, ENTRE ELECTRODOS ESFÉRICOS (VALORES DE CRESTA)

Separación entre electrodos cm	Diámetro de la esfera en cm: 6,25		12,5		25	
	Valor de cresta con impulsos negativos kV	Valor de cresta con impulsos positivos kV	Valor de cresta con impulsos negativos kV	Valor de cresta con impulsos positivos kV	Valor de cresta con impulsos negativos kV	Valor de cresta con impulsos positivos kV
0,5	17,0	17,0	—	—	—	—
1,0	31,3	31,3	31,7	31,7	—	—
1,5	44,5	44,8	44,9	44,9	—	—
2,0	57,0	57,4	58,0	58,0	—	—
2,5	68,8	69,3	70,8	70,8	72	72
3,0	78,8	79,4	83,5	83,5	—	—
3,5	86,6	88,0	95,0	95,3	—	—
4,0	93,6	—	106,0	108,0	—	—
4,5	99,8	—	117,0	120,0	—	—
5,0	105,5	—	127,0	132,3	136	136
5,5	—	—	135,3	142,5	—	—
6,0	—	—	143,5	153,8	—	—
6,25	—	—	147,5	158,0	—	—
7,0	—	—	157,7	171,0	—	—
7,5	—	—	—	—	192	196
8,0	—	—	170,5	—	—	—
9,0	—	—	182,0	—	—	—
10,0	—	—	—	—	241	252
11,0	—	—	—	—	—	—
12,0	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	278	296
15,0	—	—	—	—	309	334
17,5	—	—	—	—	338	364
20,0	—	—	—	—	362	390
22,5	—	—	—	—	379	409
25,0	—	—	—	—	393	426

relativa, referida a la unidad para la condición normal, recién establecida, puede expresarse por

$$\delta = \frac{3{,}926\ p}{273 + t}$$

p = presión barométrica, en cm de mercurio
t = temperatura en °C

La rigidez dieléctrica es proporcional a la densidad δ, excepto a presiones muy bajas o muy altas.

La tensión disruptiva, que depende directamente de la rigidez dieléctrica, está también afectada por la forma, dimensiones y separación de los electrodos o terminales metálicos y por las características de la tensión aplicada, según se expresa en la tabla 74.

También está influida por la densidad. Para determinar la tensión disruptiva para una distancia dada entre electrodos, se multiplica la tensión correspondiente a la distancia, expresada en la tabla anterior, por el factor de corrección correspondiente a cada densidad relativa y que se expresan en la tabla que sigue a continuación (electrodos esféricos).

TABLA 75. FACTORES DE CORRECCIÓN PARA DETERMINAR LA TENSIÓN DISRUPTIVA DEL AIRE, SEGÚN LA DENSIDAD RELATIVA

Densidad relativa	Diámetro de la esfera en cm: 6,25	12,5	25
0,50	0,547	0,535	0,527
0,55	0,595	0,583	0,575
0,60	0,640	0,630	0,623
0,65	0,686	0,677	0,670
0,70	0,7[illegible]	0,724	0,718
0,75	0,777	0,771	0,766
0,80	0,821	0,816	0,812
0,85	0,866	0,862	0,859
0,90	0,910	0,908	0,906
0,95	0,956	0,955	0,954
1,00	1,000	1,000	1,000
1,05	1,044	1,045	1,046
1,10	1,090	1,092	1,094

Cuando la tensión continua que se aplica a un par de conductores paralelos, aumenta lentamente, se alcanza una tensión en la cual se oye un silbido característico, acompañado de una luz violeta pálida, visible en la oscuridad y que se denomina *punto corona visual crítico;* la variación de la tensión en que aparece este punto crítico, en función del diámetro del conductor, está representada en la figura 99. La luminiscencia empieza en el punto de máximo gradiente de tensión es decir, en la superficie del conductor. En la región de ruptura, el aire se hace conductor y aumenta de esta forma el diámetro eficaz del conductor la corona envuelve al conductor como un cilindro concéntrico y el diámetro exterior aumenta, de forma que el gradiente disminuye hasta la tensión de ruptura del aire. Cuando la tensión aplicada aumenta suficientemente, después de la aparición del efecto corona, se provocará una descarga disruptiva de conductor a conductor, en forma de chispa. Sin embargo, hay una separación crítica mínima de los conductores, por debajo de la cual, se produce la descarga disruptiva sin aparición del efecto corona. Para tres tipos de electrodos, que se citan a continuación, se han determinado experimentalmente las siguientes distancias críticas entre conductores:

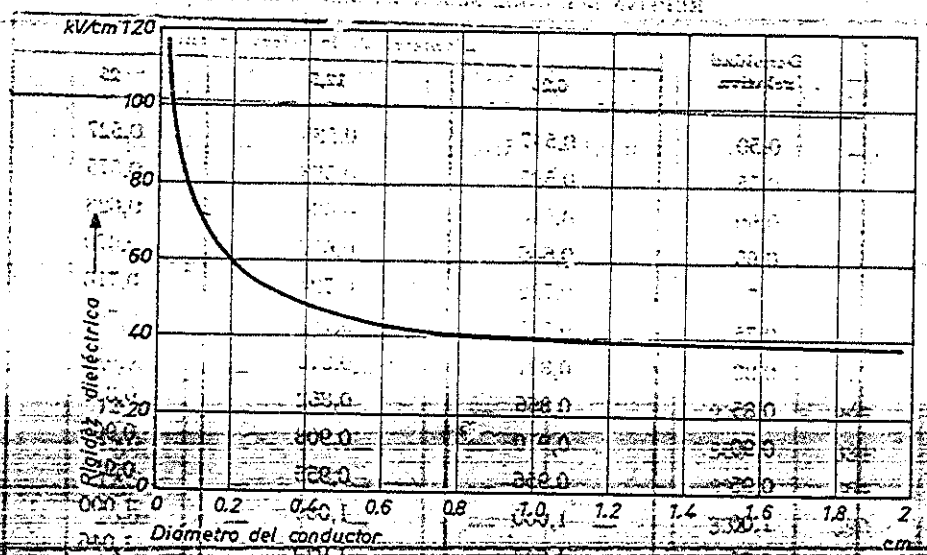


Fig. 99.—Variación de la tensión crítica visual del aire, en función del diámetro del conductor.

Para cilindros concéntricos

$$\frac{R}{r} = 2{,}72$$

r = radio interior
R = radio exterior

Para conductores paralelos:

$$\frac{S}{r} = 5{,}85$$

r = radio de los conductores
S = separación entre sus centros

Para esferas iguales

$$\frac{X}{R} = 2{,}04$$

R = radio de las esferas
X = longitud de la separación entre sus superficies más próximas.

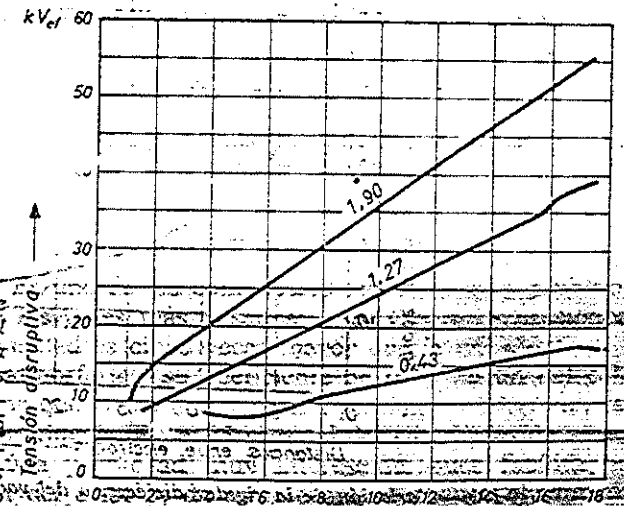


Fig. 100.—Variación de la tensión disruptiva del aire en función de la presión, para distintas separaciones entre electrodos esféricos de 25 mm de diámetro. El valor de las separaciones en mm, está indicado sobre las curvas.

El aire comprimido se emplea como dieléctrico en los condensadores patrones, en los generadores electrostáticos, en los cables de alta tensión y en disyuntores de potencia. La tensión disruptiva entre esferas de 2,54 cm de diámetro, se indica en la figura 100. A continuación, se detallan algunas interesantes conclusiones, obtenidas experimentalmente:

a) La tensión disruptiva en el aire aumenta con la elevación de presión del aire por encima de la presión atmosférica, hasta alcanzar un valor máximo: si la presión sigue aumentando la tensión disruptiva permanece constante.

b) Si la descarga disruptiva no está precedida de efecto corona, la tensión disruptiva máxima se alcanza entre 18 y 20 atmósferas. Según estos datos, la Ley de Paschen no se mantiene con presiones superiores.

El vacío como dieléctrico

A los efectos eléctricos, se considera alcanzado el vacío, cuando la conducción y la tensión entre electrodos metálicos, se ha hecho

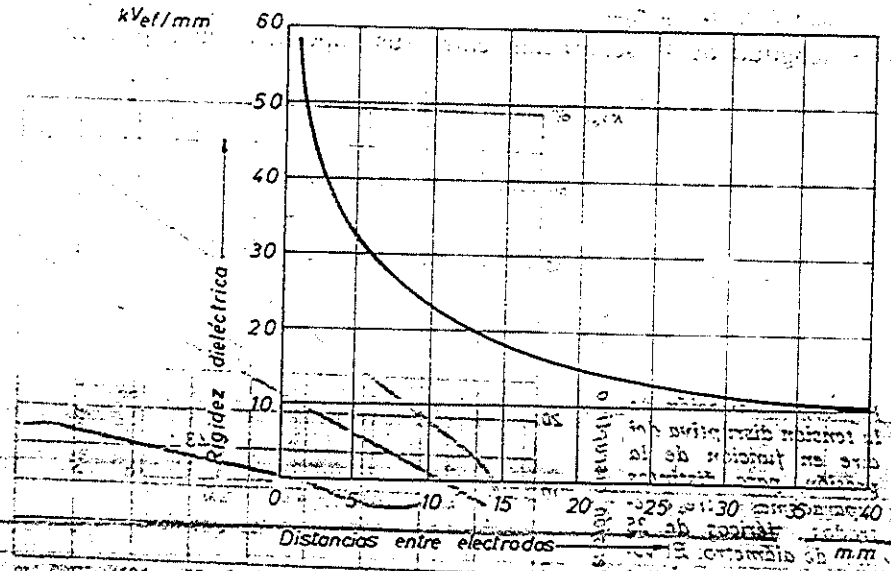


Fig. 101.—Variación de la rigidez dieléctrica del vacío, en función de la distancia entre electrodos.

independiente de la presión del gas residual. Se entiende que, en condiciones normales, la ionización gaseosa es despreciable a presiones por debajo de 10^{-5} mm de mercurio. En estas condiciones, el mecanismo de la ruptura depende exclusivamente de la tensión aplicada, del material y condición superficial de los electrodos y de la configuración de éstos.

Los gases enrarecidos hasta los límites indicados anteriormente y aún más (con los actuales medios técnicos se pueden alcanzar presiones de hasta 10^{-7} mm de mercurio), tienen notables propiedades aislantes. En la figura 101 se expresa la variación de la rigidez dieléctrica en el vacío, en función de la distancia entre electrodos, cuando éstos están constituidos por discos planos de acero.

La rigidez dieléctrica del aire enrarecido es muy elevada para pequeñas distancias interelectródicas y alcanzan valores no igualados ni con los mejores materiales aislantes sólidos. El valor de la tensión disruptiva disminuye cuando aumenta la distancia interelectródica, como sucede con todos los materiales aislantes.

El aislamiento a base de gases enrarecidos se emplea industrialmente en las válvulas electrónicas de vacío, tubos de rayos X, tubos de rayos catódicos, pequeños interruptores de mercurio, etc.

El gas hexafluoruro de azufre

El gas *hexafluoruro de azufre* es cada vez más empleado como aislante en disyuntores de potencia, en barras de distribución de alta tensión, en subestaciones blindadas de distribución, etc. Este gas es de aparición bastante reciente en el mercado y, por sus excelentes propiedades aislantes, está sustituyendo progresivamente a los demás gases en sus aplicaciones electrotécnicas. Se ha comprobado que es el único gas que posee reunidas, las propiedades físicas, químicas y eléctricas, favorables para la extinción de los arcos eléctricos formados durante las conexiones y desconexiones de los disyuntores.

El hexafluoruro de azufre gaseoso es incoloro, inodoro, no tóxico y no inflamable. Es uno de los compuestos químicos más estables y, también, uno de los gases más pesados: a 20° C y a la presión atmosférica, su densidad es cinco veces mayor que la del aire.

A la presión atmosférica, su coeficiente de transmisión del calor es 1,6 veces mayor que el del aire y, a una presión de 2 kg/cm², este coeficiente es, aproximadamente, 25 veces el del aire a presión atmosférica. Esta es una propiedad muy interesante, pues facilita una rápida disipación del calor y, de esta forma, se reduce el aumento de temperatura global en el equipo.

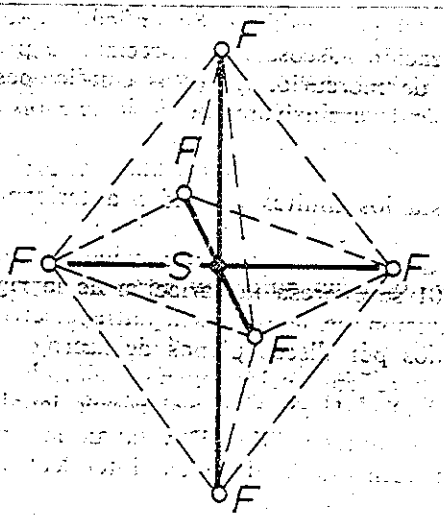


Fig. 102.—Representación espacial de la molécula de hexafluoruro de azufre.

La estructura molecular del hexafluoruro de azufre comprende, un átomo de azufre central, unido a seis átomos de fluor dispuestos en los vértices de un octaedro (Fig. 102). Su fórmula química es

El hexafluoruro de azufre tiene una gran estabilidad química. No ataca ningún material estructural a temperaturas inferiores a 500° C, y permanece estable a temperaturas a las cuales, los aceites minerales se oxidan y descomponen. A la temperatura del arco eléctrico, se descompone parcialmente en fluoruros de azufre inferiores, pero el grado de descomposición es muy pequeño, debido a que la mayoría de productos resultantes se recomponen inmediatamente para formar de nuevo el hexafluoruro de azufre, con el resultado de que éste permanece intacto después de sucesivas rupturas. Las pequeñas cantidades de subproductos que pueden permanecer son absorbidos por alúmina activada, dispuesta para este objeto. Durante el paso del arco, se producen fluoruros metálicos, los cuales se depositan como un polvo blanco pero debido a que tienen una elevada rigidez dieléctrica, no causan perturbación desde el punto de vista eléctrico.

A presión atmosférica, la rigidez dieléctrica del hexafluoruro de azufre es más del doble que la del aire, anhídrido carbónico, nitrógeno, etc.

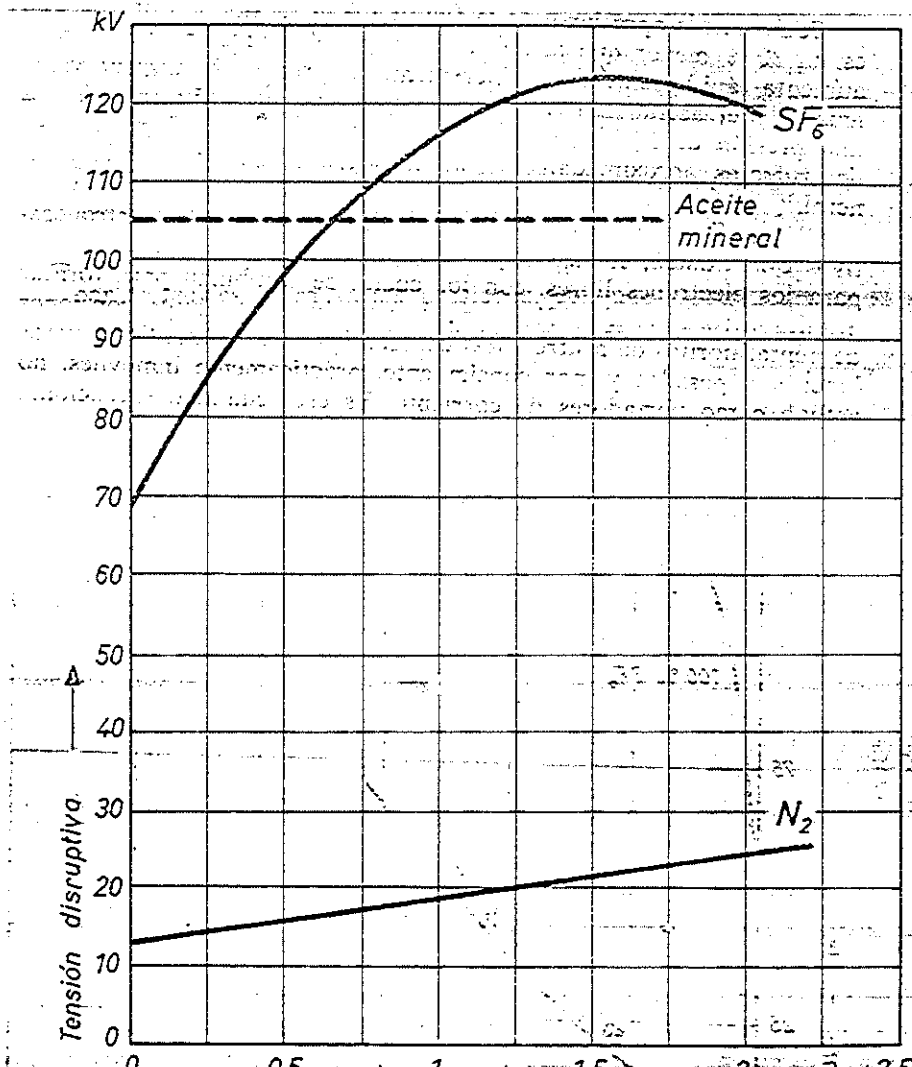


Fig. 103.—Variación de la tensión disruptiva del hexafluoruro de azufre en función de la presión y comparación con la del aceite mineral y la del nitrógeno.

Como puede apreciarse en la figura 103 la tensión disruptiva, que es un 30 % menor que la del aceite mineral a presión atmosférica, aumenta rápidamente con el incremento de presión. Alcanza un valor igual al del aceite mineral a una presión de unos 650 gr/cm², y a una presión de 1,25 kg/cm², la tensión disruptiva del hexafluoruro de azufre es, aproximadamente, un 15 % mayor que la del aceite mineral.

El hexafluoruro de azufre es uno de los gases más electronegativos que existen, es decir, que sus moléculas tienen gran afinidad para los electrones libres, con los cuales se combinan para formar hexafluoruro de azufre (SF_6) cargado negativamente, junto con iones de pentafluoruro de azufre (SF_5) cargados positivamente. Como estos iones son pesados y, por consiguiente, prácticamente inmóviles, no actúan como portadores de corriente. Es esta cualidad excepcional

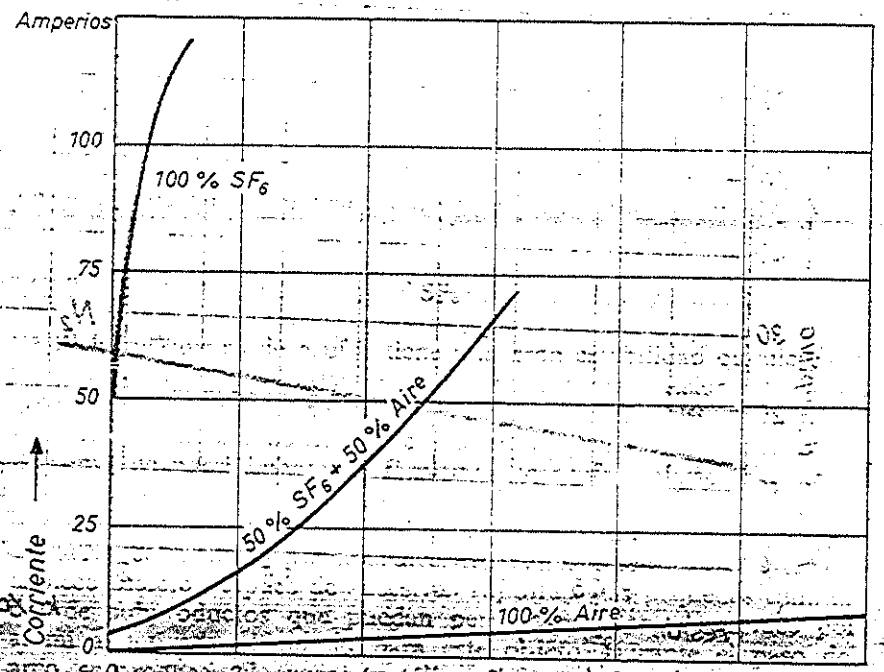


Fig. 104. Curvas comparativas de las corrientes cortadas a 2,3 kV, para el aire, para una mezcla a partes iguales de aire y hexafluoruro de azufre y para el hexafluoruro de azufre puro.

del hexafluoruro de azufre la que le proporciona sus excelentes propiedades dieléctricas y, también, su gran poder de extinción del arco.

Como las tensiones disruptivas del hexafluoruro de azufre son 24 veces mayores que las observadas en el aire, es posible cortar en hexafluoruro de azufre, corrientes 100 veces mayores que aquéllas que podrían ser cortadas en el aire, bajo las mismas condiciones. En la figura 104 se muestran los resultados experimentales obtenidos para hexafluoruro de azufre, aire y una mezcla de ambos gases a partes iguales, para varias presiones, con una distancia entre electrodos de 7,5 mm y aplicando una tensión de 2,3 kV.

16 Características generales de los materiales magnéticos

51

Campo magnético

Un *campo magnético* es una región del espacio en la que existe un estado magnético. En un punto determinado de esta región, el campo tiene dos características fundamentales: *intensidad* y *dirección*. Las líneas de dirección del campo magnético son cerradas y se denominan *líneas de fuerza o líneas de flujo*. El hecho de que los campos magnéticos se cierren siempre sobre sí mismos es la base del concepto de *circuito magnético*. A continuación, se definen algunos conceptos relacionados con el circuito magnético.

Fuerza magnetomotriz

La *fuerza magnetomotriz* F de un circuito magnético es la influencia magnetizante total que actúa en una parte cualquiera de dicho circuito. La fuerza magnetomotriz está expresada por

$$F = \frac{4\pi}{10} N I$$

I = corriente en amperios, que circula por la bobina excitadora del circuito magnético

N = número de espiras de dicha bobina

La unidad de fuerza magnetomotriz es el *gilbert*, equivalente a la fuerza magnetomotriz resultante de una corriente eléctrica de excitación del campo en un circuito de cualquier número de espiras, concatenado con el circuito magnético, cuando el producto de la corriente en *A* por el número de espiras vale

$$N\ I = \frac{1}{0{,}4\ \pi}$$

La diferencia de potencial magnético entre dos puntos cualquiera de un circuito magnético es igual a la fuerza magnetomotriz existente entre estos dos puntos.

Intensidad del campo magnético

A la *intensidad del campo magnético H* se la llama también *fuerza magnetizante, fuerza magnética, intensidad magnética* y, por algunos autores, *excitación magnética específica*. Se define como el gradiente en el espacio de la fuerza magnetomotriz en un punto cualquiera del circuito magnético; se trata, por lo tanto, de la fuerza magnetomotriz por unidad de longitud y su expresión general es

$$H = \frac{4\ \pi\ N\ I}{10\ l}$$

I = corriente en amperios, que circula por la bobina excitadora del circuito magnético
N = número de espiras de dicha bobina
l = longitud de la bobina, en cm

Para una bobina que tiene *n* espiras por cm la expresión anterior adopta la forma

$$H = 0{,}4\ \pi\ n\ I$$

La unidad de intensidad del campo magnético es el *cersted*, equivalente a un gilbert por cm.

Flujo magnético

El *flujo magnético* Φ se produce en un medio por una fuerza

magnetomotriz cuando varía la magnitud de la tensión inducida o las condiciones magnéticas. Está definida por

$$\Phi = \mu\ H\ s$$

μ = permeabilidad magnética (definida más adelante)
H = intensidad del campo magnético, en cersteds
s = sección transversal del campo magnético, en cm²

La unidad de flujo magnético es el *maxwell*, que corresponde al flujo total que emana de un polo magnético de fuerza unidad dividido por 4 π.

Inducción magnética

La *inducción magnética* B, llamada también *densidad de flujo magnético*, es el flujo por unidad de superficie en una sección perpendicular a la dirección del flujo; se define por la ecuación

$$B = \frac{d\ \Phi}{d\ s}$$

La unidad de inducción magnética es el *gauss*, igual a un maxwell por cm². La inducción total puede expresarse por la suma de dos partes

$$B = \mu\ H = H + 4\ \pi\ J$$

La cantidad *J* es la *intensidad de imanación* y equivale al momento magnético por unidad de volumen. La *intensidad de imanación específica* es el cociente de la intensidad de imanación por la densidad del material, es decir

$$J_e = \frac{J}{d}$$

Es decir, que la inducción magnética depende de dos magnitudes:

1.° El campo magnético
2.° La intensidad de imanación

Por lo general, el estado magnético de un cuerpo se caracteriza

por el valor de la inducción. En los materiales fuertemente magnéticos, o ferromagnéticos, para

$$H < 20 \text{ Oersteds}$$

se confunden prácticamente B y $4 \pi J$, es decir, que se tiene

$$B \approx 4 \pi J$$

Inducción normal

Es la inducción de un material magnético que corresponde a una fuerza magnética dada, cuando el material está en condiciones magnéticas simétricamente cíclicas con respecto a la fuerza magnética dada. Esta condición se establece desimanando el material y sometiéndolo después a un número suficiente de inversiones de fuerza magnética, para llevarlo a las condiciones cíclicas. Resumiendo, la inducción normal es el límite del valor de la inducción magnética, positivo o negativo, en un material magnético que se ha magnetizado en ciclo simétrico.

Inducción intrínseca

La *inducción intrínseca* B_i llamada también *inducción férrica*, es el exceso de la inducción en un material magnético sobre la inducción en el vacío, para un determinado valor de la fuerza magnética. Está expresada por

$$B_i = B - H$$

o también por

$$B_i = 4 \pi J$$

Ya hemos dicho anteriormente que en los materiales ferromagnéticos

$$B \approx B_i$$

Inducción de saturación

La *inducción de saturación* B_s es la inducción intrínseca máxima posible en un material magnético.

Permeabilidad magnética

La *permeabilidad magnética* μ es la relación entre el valor de la inducción magnética en un medio y la fuerza magnética en ese medio, es decir

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Se definen los siguientes valores de la permeabilidad:

a) *Permeabilidad normal* μ, o relación entre la inducción normal y la fuerza magnética, es decir

$$\mu = \frac{B}{H}$$

b) *Permeabilidad inicial* μ_o, o valor límite de la permeabilidad normal cuando la fuerza magnética y la inducción convergen hacia cero, es decir

$$\mu_o = \left(\frac{B}{H} \rightarrow 0 \right)$$

c) *Permeabilidad diferencial* μ_d, o relación entre el aumento positivo de inducción normal y el aumento positivo de la fuerza magnética, cuando estos aumentos son infinitamente pequeños, o sea

$$\mu_d = \frac{dB}{dH}$$

d) *Permeabilidad incremental* μ_Δ, es decir, la relación entre la variación cíclica de inducción y la correspondiente variación cíclica de fuerza magnética, cuando el valor medio de la inducción es distinto de cero.

e) *Permeabilidad reversible* μ_r, es la permeabilidad incremental, anteriormente definida, cuando la variación de la inducción es infinitamente pequeña.

f) *Permeabilidad intrínseca*, o relación entre la inducción intrínseca y la fuerza magnética correspondiente, o sea

$$\mu_i = \frac{4 \pi J}{H}$$

Susceptibilidad magnética

La *susceptibilidad magnética* $\varkappa$ es la relación entre la intensidad de imanación J y la fuerza magnética H, y se expresa generalmente por

$$\varkappa = \frac{J}{H}$$

La relación entre la permeabilidad magnética y la susceptibilidad magnética puede expresarse por

$$\mu = 1 + 4\pi\varkappa$$

La *susceptibilidad específica* de un material magnético, es el cociente de la susceptibilidad magnética de este material por su densidad, o sea

$$\varkappa_e = \frac{\varkappa}{d}$$

Permeancia

La *permeancia* $\mathcal{P}$ es la propiedad de un circuito magnético o de una parte cualquiera de un circuito magnético, que determina el flujo magnético total correspondiente a una fuerza magnetomotriz dada, como se indica en la expresión

$$\Phi = \mathcal{F}\mathcal{P}$$

En un circuito lineal uniforme, la permeancia se expresa por

$$\mathcal{P} = \mu\frac{s}{l}$$

l = longitud del circuito, en cm
s = sección transversal, en cm²
μ = permeabilidad, supuesta constante

Reluctividad y reluctancia

La *reluctividad* ν es la inversa de la permeabilidad, o sea

$$\nu = \frac{1}{\mu}$$

pero la permeabilidad es de empleo más corriente en Electrotecnia.

La *reluctancia* $\mathcal{R}$ es la inversa de la permeancia, o sea

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mathcal{P}}$$

La expresión del flujo magnético, en función de la fuerza magnetomotriz y de la reluctancia, es la siguiente

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}}$$

La unidad de reluctancia no tiene nombre especial y corresponde a la reluctancia de un circuito magnético lineal uniforme, en el vacío, de una longitud de 1 cm y de una sección transversal de 1 cm².

Remanencia

Es la inducción magnética que queda en un circuito magnético, después de haber suprimido la fuerza magnética aplicada. Si hay entrehierros en el circuito, la remanencia será inferior a la inducción residual (definida más adelante); si no existen entrehierros en el circuito, la remanencia será igual a la inducción residual.

Inducción residual

La *inducción residual* B_r es la inducción magnética que queda en un material cuando la fuerza magnética efectiva ha sido reducida a cero; el valor de la inducción residual está indicado por OR en la figura 105. Cuando el material está sometido a condiciones de imanación cíclicas simétrica, la inducción residual se denomina *inducción residual normal.*

Retentividad

Es la propiedad de un material, determinada por la inducción residual normal que queda después de suprimir la fuerza magnética aplicada correspondiente a la inducción de saturación del material. La *coercividad* es un término que significa la necesidad de aplicar una fuerza magnética negativa para anular los efectos de la retentividad y reducir a cero, el valor de la inducción residual.

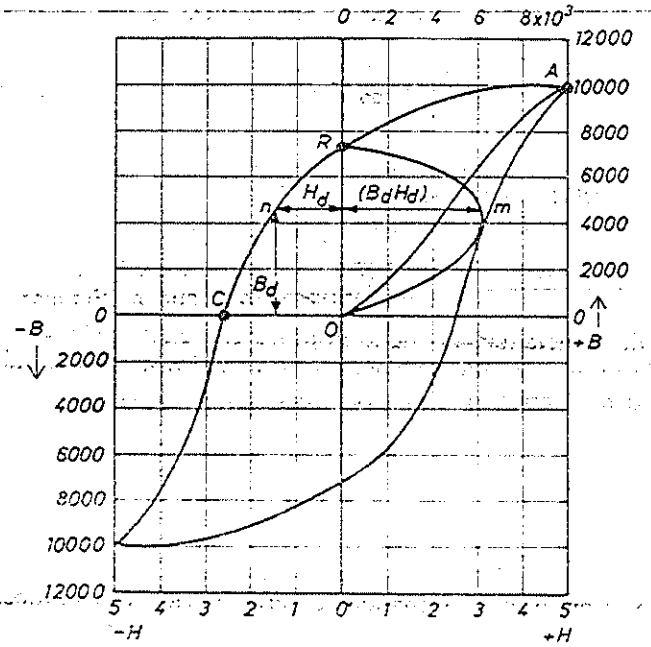


Fig. 105. — Ciclo de histéresis típico, con indicación de la inducción residual, la fuerza coercitiva y la energía externa.

Fuerza coercitiva

La *fuerza coercitiva* H_c es la fuerza magnética negativa, necesaria para reducir la inducción residual a cero, y representada por OC en la figura 105. Cuando se trata de inducción residual normal, se habla de *fuerza coercitiva normal*.

Energía externa de un material magnético

La *energía por unidad de volumen* de un material magnético, disponible para mantener un campo magnético, se llama *energía externa* y está representada por el producto de las coordenadas (inducción magnética y fuerza magnética) de la curva de imantación, es decir, por

$$W_M = B\,H$$

En la figura 105 se expresan los valores de la curva

$$W_M = f(B, H)$$

La *energía externa máxima* ($B_d\,H_d$ en la figura 105) es un criterio muy útil de la calidad de un material magnético para imán permanente. Por el contrario, el valor de la energía interna mínima constituye un criterio de la calidad de los materiales magnéticos para núcleos de relés, bobinas de contactores, etc.

Pérdidas magnéticas

Constituyen la potencia consumida en un material magnético sometido a una inducción variable. Estas pérdidas tienen dos componentes principales:

1. *Pérdidas por histéresis* P_h; el área del ciclo de histéresis constituye una medida del trabajo transformado en calor por cm³ del material, durante un ciclo completo de imanación, o sea

$$s_h = \int H\,dB$$

Según Steinmetz, la *potencia perdida por histéresis* por cm³ de material es, en función de la inducción máxima

$$P_h = \eta\, f\, B^{1,6}_{max} \times 10^{-7} \quad vatios/cm^3$$

B_{max} = inducción máxima, en gauss
f = frecuencia en Hz
η = coeficiente de histéresis, que depende del material

2. *Pérdidas por corrientes parásitas* P_p; las corrientes parásitas o de Foucault, originadas en el material por la circulación de corrientes debidas a las fuerzas electromotrices inducidas en este material por las variaciones de inducción, producen también pérdidas de potencia. Según Steinmetz, la *potencia perdida por corriente parásitas* por cm³ de material es, en función de la inducción máxima

$$P_p = \varepsilon\, f^2\, B^2_{max} \times 10^{-7} \quad vatios/cm^3$$

B_{max} = inducción máxima, en gauss
f = frecuencia, en Hz
ε = coeficiente de corrientes parásitas, que depende del material

Una aproximación satisfactoria para la relación entre las *pérdidas totales*

$$P = P_h + P_p$$

y las inducciones B, especialmente cuando se trata de valores elevados de estas últimas, está dado por la siguiente ecuación exponencial

$$P = P_1 \left(\frac{B}{B_1} \right)^k$$

que se determina experimentalmente, hallando el valor de las pérdidas P_1 para una inducción B_1 y el exponente k, típico de cada material. Como veremos más adelante, en coordenadas logarítmicas dobles, se obtiene una línea recta, que representa la *curva característica de pérdidas* de cada material.

La *cifra de pérdidas* da el valor de las que se producen por imanación, expresadas en vatios por kilogramo de material, para la inducción expresada en 10^3 gauss. Por ejemplo, P_8 significa la cifra de pérdidas para una inducción de 8 000 gauss.

Envejecimiento de los materiales magnéticos

El *envejecimiento* es la variación, natural o acelerada, de las propiedades magnéticas de un material magnético. Cuando esta expresión se refiere a las pérdidas de potencia significa, salvo indicación contraria, un aumento de estas pérdidas. Cuando se refiere a la permeabilidad o a la remanencia, la expresión indica una disminución de estas propiedades.

Curvas de características magnéticas

Para conocer las propiedades y campos de aplicación de los materiales magnéticos, se preparan un conjunto de curvas o *características magnéticas* en las que, gráficamente, pueden apreciarse estas propiedades. Las más interesantes de estas características, son las siguientes:

Curva de imanación. Llamada también *curva de magnetización* (Fig. 106), representa la variación de la inducción magnética B en función de la fuerza magnética H, para una muestra anular de ensayo. Algunas veces, la inducción magnética se expresa en función de la intensidad de imanación

$$I = \frac{B - H}{4\pi}$$

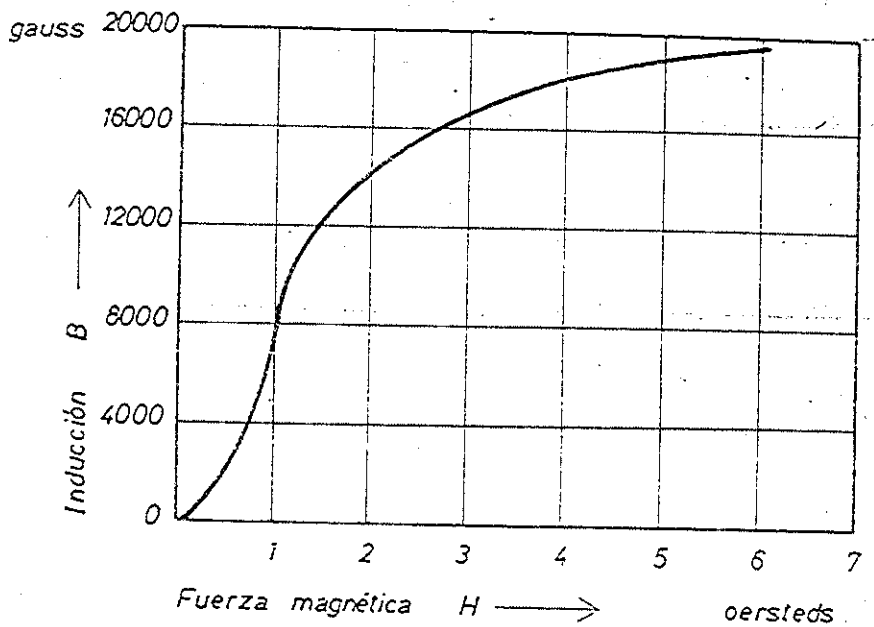


Fig. 106. — Curva de imanación de un material magnético.

La inducción intrínseca $B - H$, es el aumento de inducción debido solamente al material y adquiere importancia cuando la fuerza magnética es grande, por ejemplo, cuando se determina la inducción de saturación B_s, que es el mayor de $B - H$ que se puede alcanzar con un material.

Como puede apreciarse en la figura 107, la curva de imanación puede dividirse en tres regiones, separadas por el codo de la curva y por el punto de inflexión, respectivamente.

En la región inferior de la curva, esta asciende rápidamente y la permeabilidad crece al mismo ritmo. En esta zona, la permeabilidad aumenta linealmente con la fuerza magnética, según la expresión general

$$\mu = a + b \cdot H$$

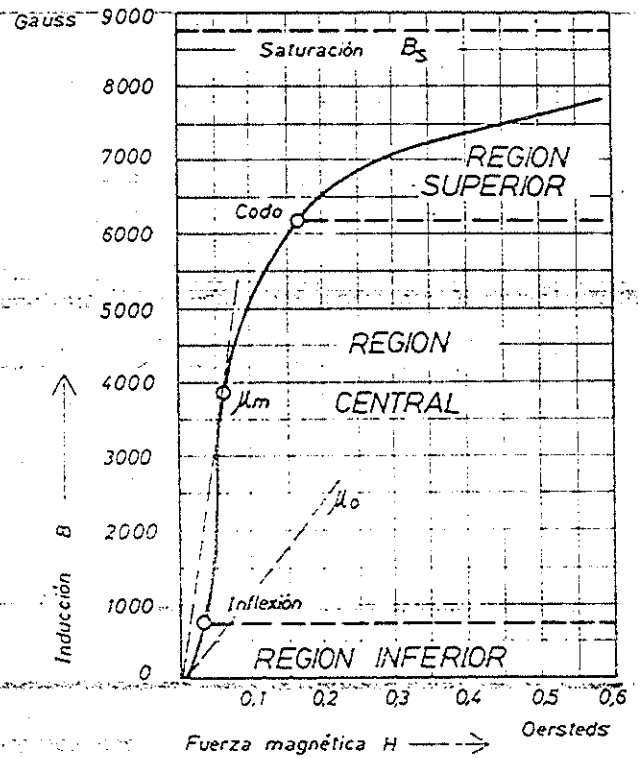


Fig. 107.—Puntos de interés especial y regiones de la curva de imanación de un material magnético.

En la región central de la curva, entre el punto de inflexión y el codo, es aplicable la ley de histéresis de Steinmetz

$$P_h = \eta\ B^{1,6}$$

A partir del codo, donde comienza la región superior, la pendiente tiende a ser cada vez menor y se aproxima asintóticamente al valor de saturación. En esta región puede aplicarse sin gran error la siguiente expresión general

$$\frac{1}{\mu} = c + d\,H$$

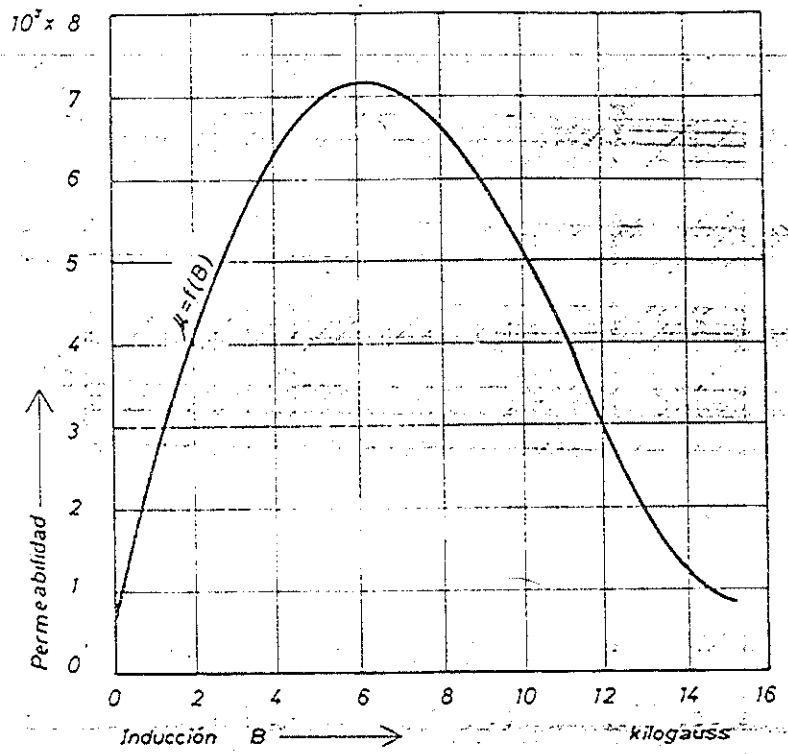


Fig. 108.—Curva de permeabilidad en función de la inducción magnética, de la aleación hierro-silicio al 4 %.

Curva de permeabilidad. La facilidad con que puede magnetizarse un material magnético se puede medir por la relación

$$\mu = \frac{B}{H}$$

La *curva de permeabilidad* (Fig. 108) representa la inducción normal B en función de la permeabilidad μ. Actualmente se emplean diagramas con ambas escalas logarítmicas (Fig. 109), en los que puede leerse directamente el valor de la permeabilidad sobre la curva de imanación.

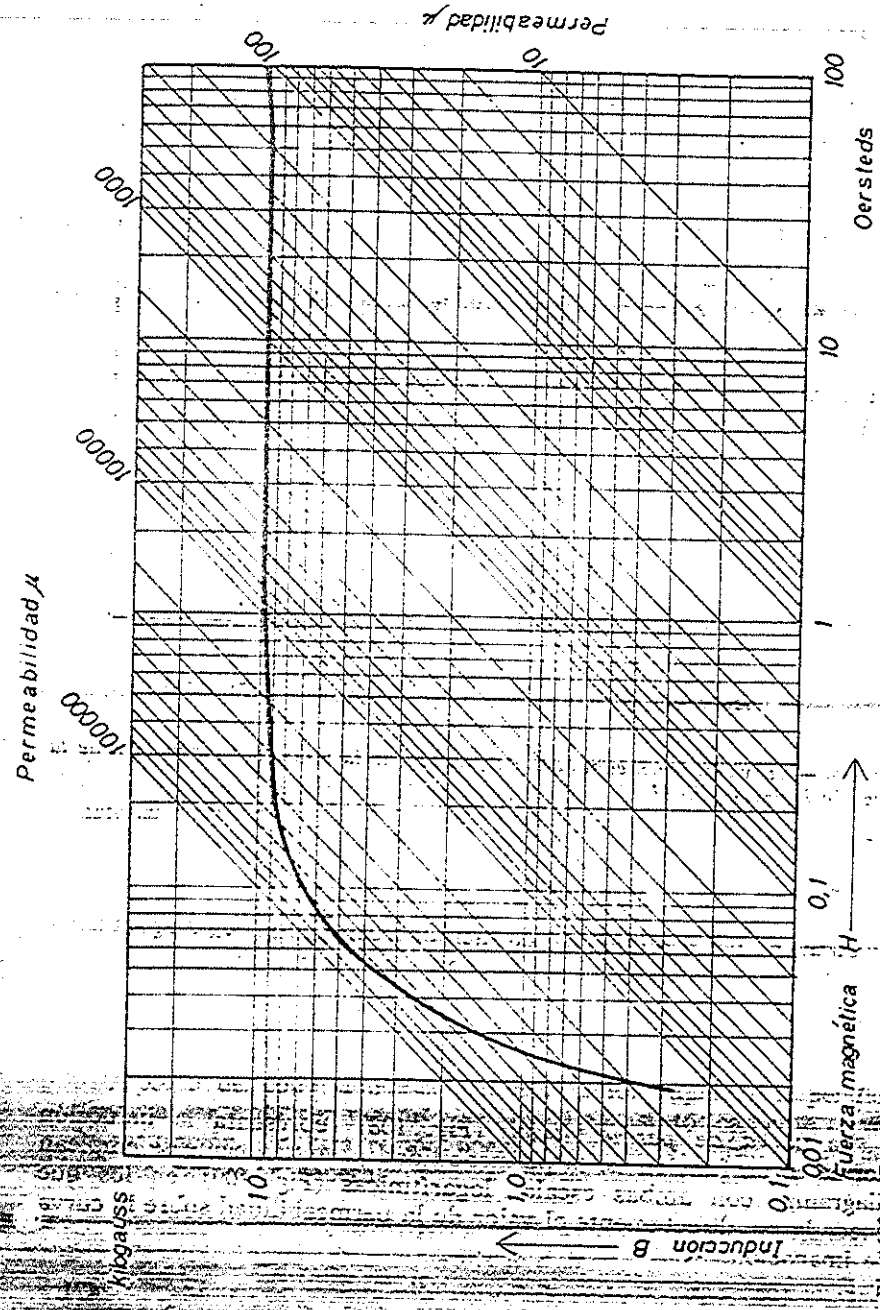


Fig. 109.—Representación, en escalas logarítmicas de la inducción, la fuerza magnética y la permeabilidad de la chapa de Permalloy de 0,12 mm.

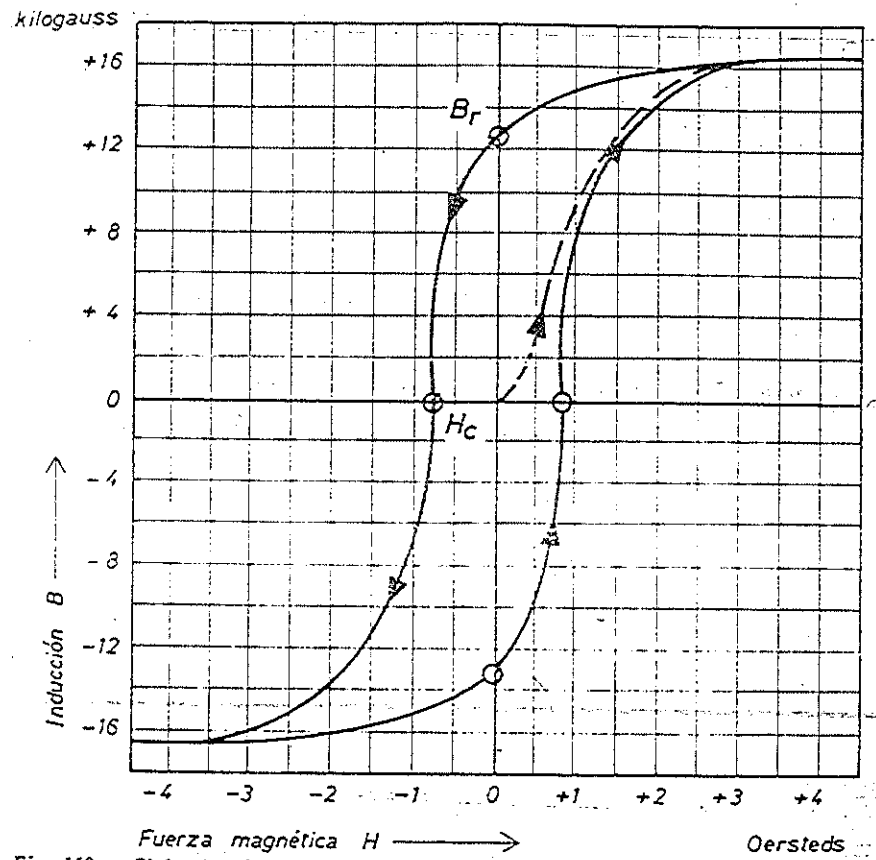


Fig. 110.—Ciclo de histéresis de un material magnético, con indicación de los puntos de interés especial.

Ciclo de histéresis. Otras propiedades importantes de los materiales magnéticos, se hacen patentes mediante los bucles de histéresis (Fig. 110), que se obtienen representando la inducción B_1, en función de la fuerza magnética H y haciendo que H llegue al máximo y luego disminuya hasta cero, aumente después hasta el máximo en sentido negativo, se reduzca nuevamente a cero y finalmente alcance el primer máximo, tal como se indica en la figura 110.

Los valores de B y H correspondientes a los puntos en que la curva corta a los eje se denominan:

— *Inducción residual* B_r, al valor de B que corta al eje de las ordenadas.
— *Fuerza coercitiva* H_c, al valor de H que corta al eje de las abscisas.

La superficie encerrada dentro del bucle de histéresis, mide la energía magnética transformada en calor durante el ciclo y vale

$$W_h = \frac{1}{4\pi} \int H \, dB \quad \text{ergios por cm}^3$$

cuando H está expresada en cersteds y B en gauss.

El ciclo de histéresis constituye un medio de comparación de las pérdidas por histéresis de diferentes materiales. También resulta muy útil para predeterminar las propiedades de los materiales magnéticos y para calcular los valores de la inducción residual y de la fuerza coercitiva.

Curva de desimanación. La parte de curva del ciclo de histéresis que pertenece al segundo cuadrante, desde B_r a H_c (Fig. 111), se denomina *curva de desimanación* o *curva de desmagnetización* y es especialmente importante para la descripción de los materiales para

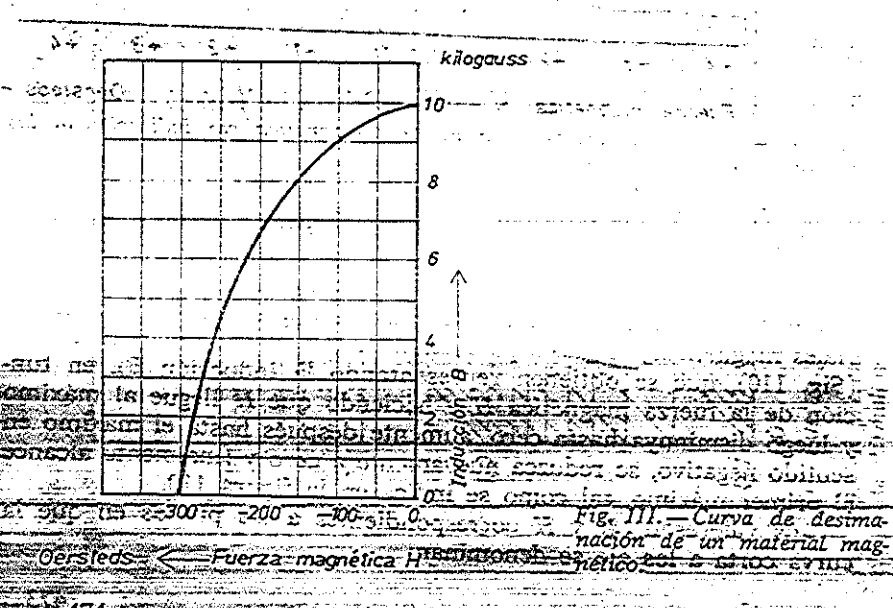


Fig. 111. — Curva de desimanación de un material magnético.

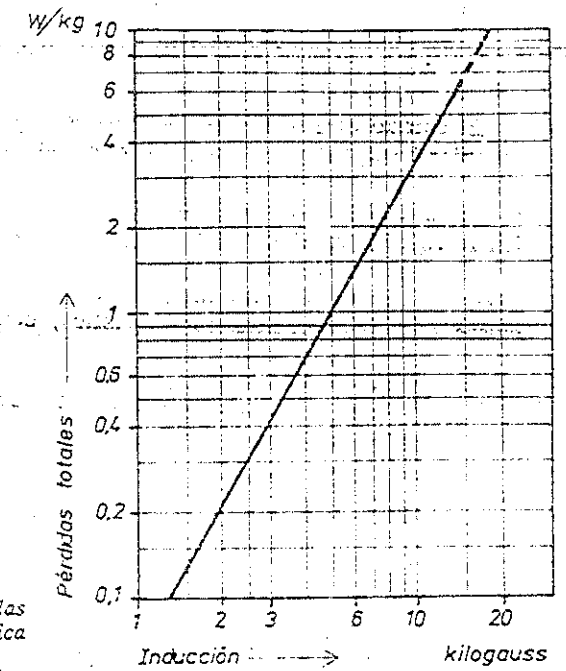


Fig. 112. — Curva de pérdidas totales de la chapa magnética para dinamos.

imanes permanentes; al hablar de estos materiales se tratará esta curva con más detalle.

Curva característica de pérdidas totales. Hemos visto en un parágrafo anterior que las pérdidas totales pueden expresarse por

$$P = P_1 \left(\frac{B}{B_1} \right)^k$$

que es una ecuación exponencial, siendo el exponente k característico de cada material. Para representar gráficamente estas pérdidas, se emplean diagramas con ambas escalas logarítmicas (Fig. 112), con lo que la ecuación anterior se convierte en una línea recta. De la misma forma pueden representarse las pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, cuyas ecuaciones también son exponenciales.

Efecto de la temperatura sobre las propiedades magnéticas

El estado magnético de un material puede alterarse, no solamente cambiando la fuerza magnética, sino también la temperatura, la cual afecta a las propiedades magnéticas de todos los materiales, en una forma que depende de la inducción y de la naturaleza del material. En la figura 113 se muestra este efecto para el caso del hierro.

Eventualmente, al elevarse la temperatura, el material acaba por perder sus propiedades magnéticas. Para cada material magnético, existe una temperatura característica, denominada *punto de Curie,*

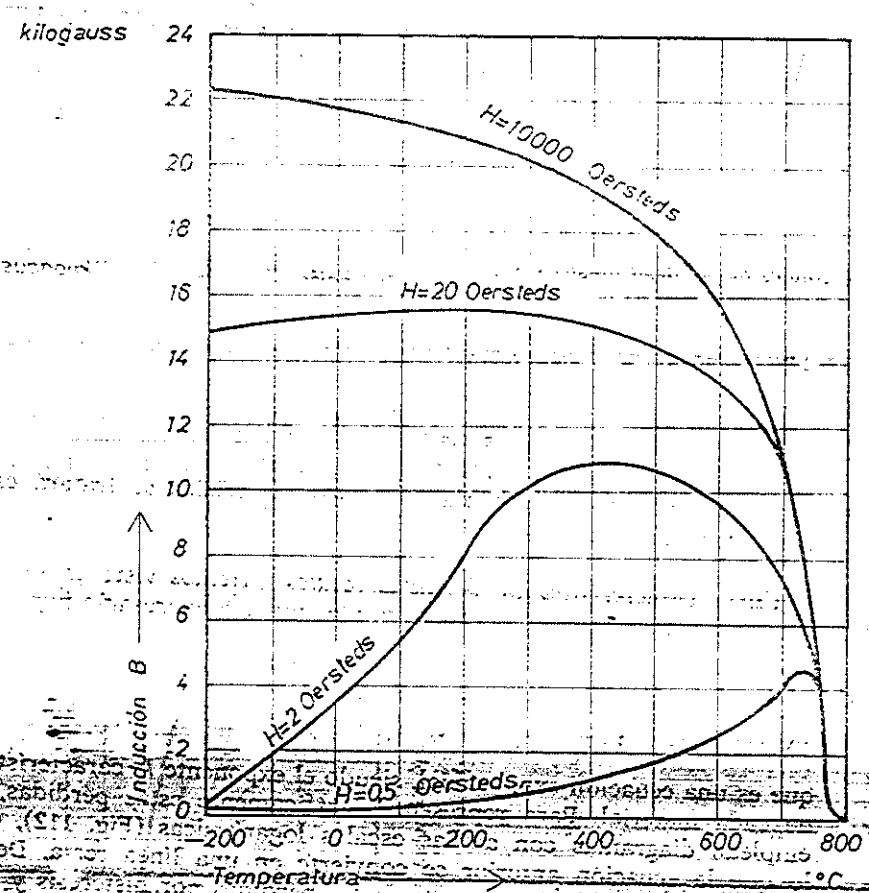


Fig. 113. Inducción magnética del hierro, para varios valores de la fuerza magnética, en función de la temperatura.

temperatura de Curie o punto de transformación magnética, por encima de la cual, el material se vuelve no magnético; la temperatura de Curie del hierro está próxima a 800° C, la del níquel a 400° C, y la del cobalto a 1 100° C.

En presencia de un campo magnético constante, la imantación decrece continuamente cuando la temperatura aumenta y a régimen cada vez más rápido, a medida que la temperatura se aproxima al punto de Curie (véase la figura 113). Cuando el campo magnético es poco intenso, la permeabilidad aumenta al principio con la temperatura y luego disminuye y tiende a 1, al aproximarse al punto de Curie.

Para algunas aplicaciones, es conveniente disponer de materiales, cuya permeabilidad decrezca rápidamente al aumentar la temperatura: se utilizan estos materiales para compensar los efectos de variación de temperatura en los imanes permanentes, y para estabilizar los núcleos magnéticos de polvo prensado, haciendo independiente su inductancia de la temperatura. Los materiales empleados para estos propósitos son aleaciones que tienen el punto de Curie muy próximo a la temperatura ambiente, por lo que el material pierde rápidamente su imantación cuando aumenta la temperatura. En el próximo capítulo se hablará de estas aleaciones.

Efecto de los esfuerzos mecánicos sobre las propiedades magnéticas

Al aplicar un esfuerzo mecánico de tracción o de compresión sobre un material magnético, las propiedades magnéticas de este material pueden quedar afectadas. Tal como se expresa en la figura 114, un esfuerzo mecánico que no exceda y esté próxima al límite de elasticidad del material, *aumenta* la imantación del Permalloy 45 y *disminuye* la del níquel puro. En estas condiciones, la permeabilidad de algunos materiales resulta multiplicada por el coeficiente 50, cuando dichos materiales están sometidos a esfuerzos de tracción, por debajo del límite de elasticidad.

Magnetostricción

En algunos materiales magnéticos, se ha demostrado que en las direcciones longitudinal o transversal del campo magnético se producen alargamientos o acortamientos del material imanado. A este efecto de las propiedades magnéticas sobre las dimensiones de los materiales, se denomina *magnetostricción,* reservándose el nombre de *magnetostricción positiva* cuando se producen alargamientos, y de *magnetostricción negativa* cuando se producen acortamientos. En am-

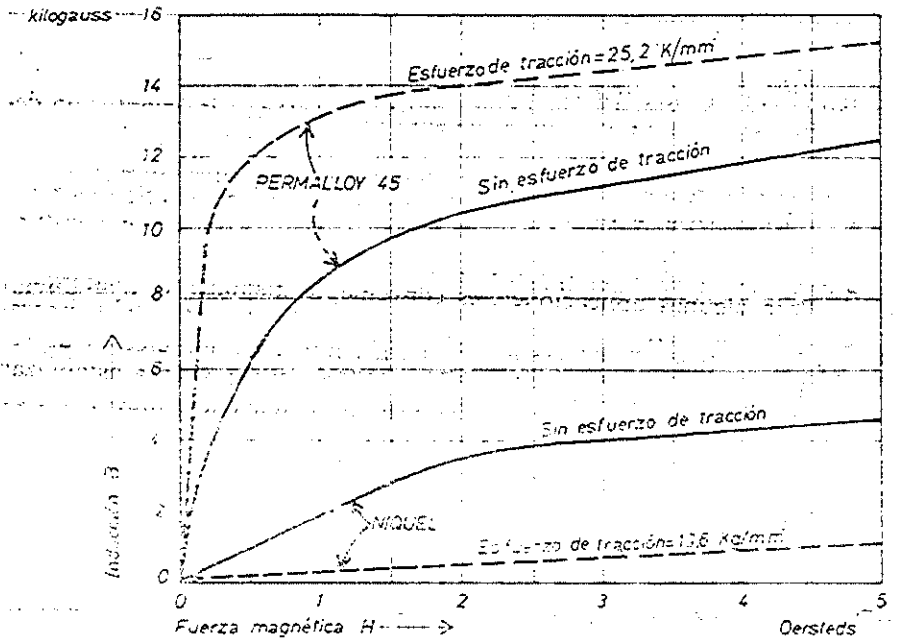


Fig. 114. — Curvas de imanación del Permalloy 45 y del níquel, sometidos a distintos esfuerzos mecánicos de tracción.

bos casos, se modifica el volumen del material *(efecto volumétrico)*.

A los materiales cuya permeabilidad aumenta por efecto de los esfuerzos de tracción, se les asigna magnetostricción positiva, a causa de que sus dimensiones aumentan en unas cuantas millonésimas de milímetro, cuando están imantados (caso del Permalloy 45); por el contrario, la permeabilidad disminuye por efecto de los esfuerzos de tracción, si la imantación provoca la contracción del material (magnetostricción negativa, caso del níquel). Algunos materiales, como el hierro, tienen magnetostricción positiva en campos magnéticos poco intensos, y magnetostricción negativa en campos intensos.

La figura 115 muestra como el Permalloy 45 y el níquel, varían de longitud cuando aumenta la intensidad del campo magnético.

El fenómeno de la magnetostricción permite transformar la energía magnética en energía mecánica. Este efecto se aprovecha en los materiales que presentan este fenómeno de manera acusada. Por ejemplo, el níquel puro y otros materiales que se examinarán en el próximo capítulo, se utilizan frecuentemente en los osciladores de magnetostricción para producir vibraciones supersónicas en el aire

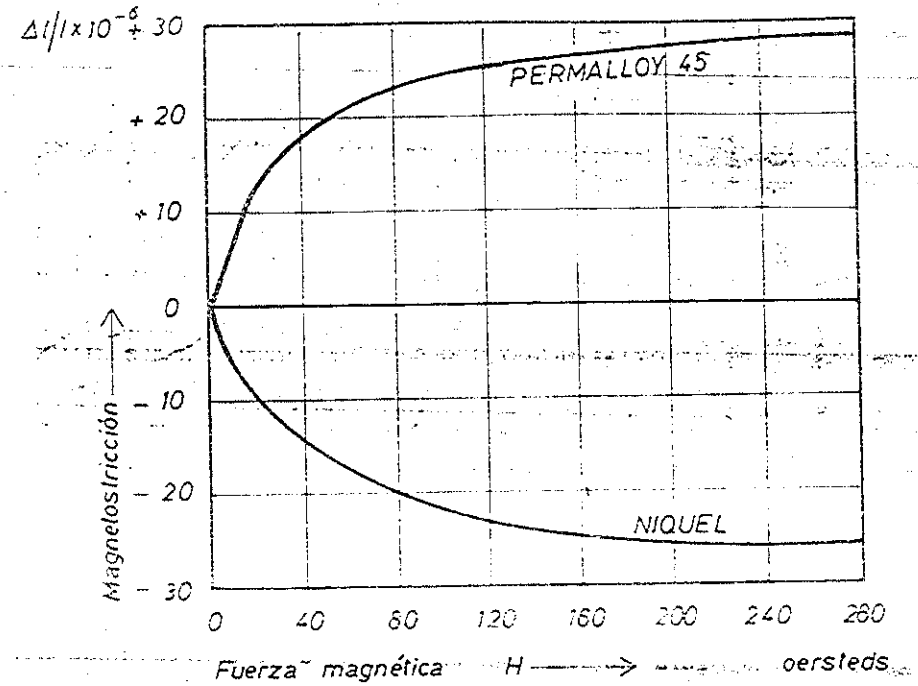


Fig. 115. — Variación relativa de la longitud en función de la fuerza magnética para el Permalloy 45 (magnetostricción positiva) y para el níquel (magnetostricción negativa).

o debajo del agua, que son utilizadas en los dispositivos de detección por ultrasonidos (sonar).

Efecto de la frecuencia sobre las propiedades magnéticas

Cuando la fuerza magnética que actúa sobre un material magnético es rápidamente alternativo, se inducen corrientes parásitas en el material. Estas corrientes impiden que la acción del campo alternativo se ejerza de manera efectiva a mayor profundidad que la determinada por una cierta distancia de la superficie. Las propiedades magnéticas del material quedan afectadas de tres maneras:

1.ª La permeabilidad efectiva disminuye.
2.ª Aumenta la pérdida de energía en el material.
3.ª Hay un tiempo de retardo entre la fuerza magnética y la inducción correspondiente.

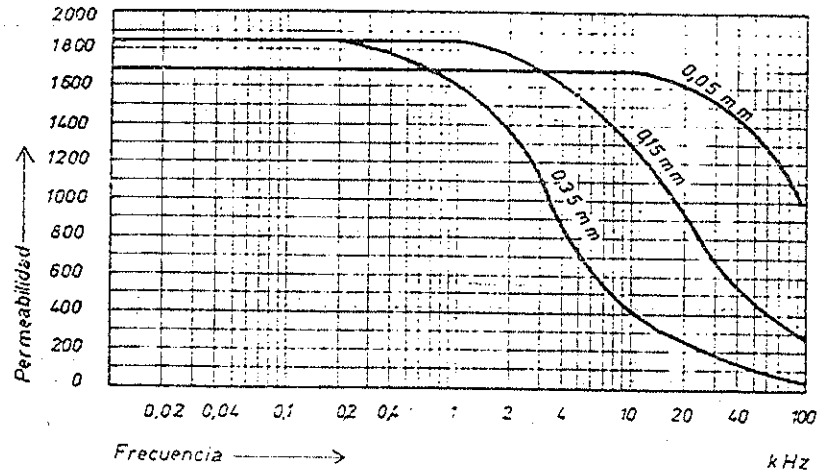


Fig. 116.—Variación de la permeabilidad en función de la frecuencia para chapas de Permalloy 45, de diferentes gruesos.

En la figura 116 se expone la variación de la permeabilidad efectiva con la frecuencia, para diferentes gruesos de chapa de Permalloy 45.

Para frecuencias mayores de 100 MHz, la permeabilidad real μ de los materiales magnéticos empieza a decrecer sustancialmente, aproximándose a valores próximos a la unidad para frecuencias del orden de 1 000 a 10 000 MHz.

Clasificación de los materiales magnéticos

El estudio de las propiedades magnéticas de los cuerpos es esencialmente experimental. Se investigan las condiciones en que se magnetizan los diferentes cuerpos, y la forma como varía su estado magnético, en función de la intensidad del campo magnético, de la temperatura, de los esfuerzos mecánicos, de la frecuencia, etc.

Desde el punto de vista de sus propiedades magnéticas, los materiales se clasifican en tres grupos:

1.° *Materiales ferromagnéticos.* Se caracterizan por el valor muy grande que puede tomar su imanación, aun con pequeños valores de intensidad del campo magnético. Estos materiales son poco numerosos, pero de la mayor importancia técnica. Entre los materiales

ferromagnéticos se incluyen: el hierro, cobalto y níquel y algunas aleaciones de estos elementos, el óxido magnético de hierro (magnetita), ciertas combinaciones del manganeso con metaloides y algunas aleaciones ternarias del manganeso. En el próximo capítulo se estudiarán con detalle los más importantes materiales ferromagnéticos, que son los de mayor interés en sus aplicaciones electrotécnicas.

Al imanarse los materiales ferromagnéticos se producen fenómenos muy complejos:

a) aparecen cargas magnéticas en la superficie del material y producen, en esta parte del cuerpo, un campo magnético que, en general, no tiene la misma dirección ni el mismo sentido que el campo magnetizante, y que se llama *campo desmagnetizante.* Ambos campos, magnetizante y desmagnetizante, tienen carácter vectorial y el estado magnético del material considerado, está determinado por la suma geométrica de ambos.

b) a un valor determinado del campo magnetizante, no corresponde un valor único, bien determinado, de la imanación, al menos en los campos de pequeño valor; esta imanación depende, esencialmente, de los valores anteriores del campo magnetizante.

2.° *Materiales paramagnéticos.* Estos materiales se imanan siempre en el mismo sentido que el campo magnético; su imanación es proporcional a la intensidad del campo magnetizante y se anula cuando éste se anula. Su susceptibilidad magnética es positiva, pero siempre muy pequeña: para obtener una imanación específica igual a 1, habría que emplear intensidades de campo del orden de varios millares de oersteds.

Entre los cuerpos paramagnéticos, se pueden citar:

Metales: platino, sodio, potasio, aluminio, manganeso, cromo, etc.

Aleaciones: a base de cobre, cromo, manganeso, vanadio, etc.

Gases: oxígeno, ozono, óxido nítrico, etc.

3.° *Materiales diamagnéticos.* Estos materiales se imanan en sentido contrario al del campo magnético. Colocados en un campo no uniforme, son rechazados hacia las partes en que el campo es débil. Su imanación es proporcional al campo y su susceptibilidad magnética es muy pequeña y siempre negativa.

En este grupo, se encuentran los siguientes materiales:

a) metaloides distintos del oxígeno

b) metales como oro, plata, mercurio, cobre, plomo, etc.

c) casi todas las sustancias orgánicas.

17 Materiales Magnéticos

81

Materiales ferromagnéticos

En el capítulo anterior se han definido las características más importantes de los materiales ferromagnéticos. Por su composición, los materiales ferromagnéticos pueden clasificarse como sigue:

a) Metales puros
b) Aleaciones

Y por sus propiedades magnéticas y específicos campos de aplicación, estos materiales se clasifican así:

a) Materiales magnéticamente blandos
b) Materiales magnéticamente duros
c) Materiales especiales

Los *materiales magnéticamente blandos* estan caracterizados por las siguientes propiedades:

a) Alta permeabilidad
b) Pequeña fuerza coercitiva
c) Pequeñas pérdidas por histéresis

Sus aplicaciones principales están en los núcleos magnéticos para máquinas eléctricas, transformadores, relés, etc., así como para aplicaciones en Electrónica. Algunas veces se emplean en forma de mú-

cleos macizos (por ejemplo, para relés de corriente continua) aunque lo general es que se utilicen en forma de chapas de diversos gruesos que, apiladas, constituyen el núcleo magnético.

Los *materiales magnéticamente duros*, están caracterizados por las siguientes propiedades:

a) Moderada o baja permeabilidad
b) Alta fuerza coercitiva
c) Altas pérdidas por histéresis

La alta fuerza coercitiva de estos materiales los hace muy apropiados para la construcción de imanes permanentes en instrumentos de medida, motores eléctricos, altavoces, etc.

Entre los *materiales especiales* se incluyen aquéllos que, si bien por su composición y propiedades hubieran podido incluirse en alguno de los dos grupos anteriores, por sus peculiaridades y aplicaciones precisan de un comentario especial. Por ejemplo, los materiales de permeabilidad constante, los materiales magnetostrictivos, etc.

En el presente capítulo se estudiarán todos los materiales ferromagnéticos que hemos citado. Antes, sin embargo, se examinarán las propiedades de los materiales ferromagnéticos puros y de la influencia de los elementos de aleación para conseguir aleaciones ferromagnéticas de propiedades previamente fijadas.

Metales ferromagnéticos

Los únicos metales ferromagnéticos conocidos son: *hierro, níquel, cobalto*. De ellos, el único con aplicación industrial es el hierro, ya que tiene una mayor susceptibilidad magnética que los otros dos y, además, resulta más económico. A continuación, se examinan las propiedades magnéticas de estos materiales.

El *hierro puro* no ha podido obtenerse, ni aun por procedimientos de laboratorio. La clase más pura de hierro comercial, producido en gran escala, contiene menos de 0,2 % total de impurezas, constituidas por carbono, manganeso, silicio, cobre, azufre, fósforo, oxígeno. Pero incluso estas pequeñas cantidades de impurezas tienen un efecto importante sobre las propiedades magnéticas del metal resultante. Las principales ventajas de este material son: una alta permeabilidad y reducidas pérdidas por histéresis, con fuerzas magnéticas bajas o moderadas. La inducción de saturación es de unos 22 500 gauss.

Refundiendo hierro electrolítico en el vacío y sometiéndolo a un recocido en atmósferas especiales, tienden a eliminarse los últimos

restos de impurezas; de esta forma, se obtiene un material cuyas principales cualidades son:

a) una inducción elevada, con fuerzas magnéticas reducidas
b) una permeabilidad máxima muy elevada (cerca de 50 000)
c) reducidas pérdidas por histéresis
d) inducción de saturación del orden de 22 500 gauss

Estas propiedades demuestran las ventajas de reducir las impurezas del hierro a los límites más bajos que puedan conseguirse. Con fuerzas magnéticas muy bajas, la permeabilidad del hierro electrolítico altamente purificado es inferior a la de las aleaciones clásicas de níquel-hierro. El punto de Curie del hierro es 790° C.

El *cobalto* no es, por sí mismo, un elemento ferromagnético importante, pero resulta de gran utilidad como elemento de aleación del hierro y del níquel. La inducción de saturación del cobalto es de unos 17 000 gauss y su permeabilidad aumenta con la temperatura hasta unos 300° C. El punto de Curie está en los 1 115° C.

El *níquel* tampoco es un elemento ferromagnético importante por sí mismo, pero sus aleaciones binarias o ternarias con hierro y cobalto tienen gran importancia comercial, como se verá en los sucesivos párrafos. La inducción de saturación del níquel es solamente de unos 6 500 gauss. Su punto de Curie está a 390° C y, a temperaturas más elevadas, se vuelve paramagnético. Su permeabilidad es aproximadamente constante hasta temperaturas de unos 340° C. La susceptibilidad magnética en una dirección cualquiera se reduce notablemente si se somete a esfuerzos de tracción y se aumenta si se somete a esfuerzos de compresión en dicha dirección; es decir, que el níquel tiene magnetostricción negativa, lo que determina su aplicación en aparatos detectores por ultrasonidos (sonar).

Aleaciones ferromagnéticas

Cuando los metales ferromagnéticos (hierro, cobalto, níquel) se alean entre sí o con otros elementos (cobre, manganeso, carbono, etcétera) pueden obtenerse materiales de propiedades previamente fijadas y aptos para determinadas aplicaciones. El conjunto básico, es decir, el punto de partida de dichos grupos de propiedades, perfectamente determinadas, está constituido por el hierro, el níquel y el cobalto, o por aleaciones binarias o ternarias de estos elementos. Aunque existen aleaciones ferromagnéticas en las que no intervienen ninguno de los elementos citados, actualmente estos materiales solamente tienen un interés teórico.

Un interés especial tiene el sistema binario hierro-níquel, en el que existen dos campos de aplicación:

1. Las aleaciones hierro-níquel, con pequeño contenido de níquel, que son magnéticamente duras.
2. Las aleaciones hierro-níquel, con gran contenido de níquel, que son magnéticamente blandas.

El dominio intermedio tiene deficientes propiedades magnéticas y no tiene interés práctico. Pero por adición de otros elementos, se constituyen aleaciones ternarias, cuaternarias, etc., que tienen propiedades paramagnéticas.

Frecuentemente, en la práctica debe renunciarse al empleo del material de mejores propiedades ferromagnéticas, para buscar otro más económico. Esta circunstancia explica la existencia de numerosas aleaciones ferromagnéticas, muchas de las cuales tienen propiedades semejantes, lo que hace aún más difícil un intento de clasificación; por lo general, los nombres de estas aleaciones aluden a sus propiedades más características.

Aunque se ha dicho anteriormente que los materiales magnéticamente duros tienen moderada permeabilidad, también se han conseguido materiales de este tipo, de alta permeabilidad. Y aunque una de las características de los materiales magnéticamente blandos es su pequeña fuerza coercitiva, también se han conseguido materiales de este tipo aptos para ser utilizados en imanes permanentes, es decir, con gran fuerza coercitiva. En su momento, volveremos a hablar de estos materiales, de gran importancia técnica para el futuro.

Materiales magnéticamente blandos

Desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas, lo que caracteriza a los *materiales magnéticamente blandos* es su estrecho ciclo de histéresis (Fig. 117); de esta forma, una vez desaparecida la fuerza magnética, estos materiales pierden pronto sus propiedades magnéticas, ya que la fuerza coercitiva es, por lo general, muy pequeña. Con esto se consigue un funcionamiento de "todo o nada" muy interesante cuando la inercia magnética es indeseable, como sucede, por ejemplo, en los circuitos magnéticos de las máquinas eléctricas y transformadores, así como en los núcleos de relés, contactores, etc., donde interesa que la armadura no quede "enganchada" cuando el dispositivo está desconectado. Además, el ciclo de histéresis de superficie reducida significa, como hemos visto en el capítulo anterior, unas reducidas pérdidas por histéresis, ya que el área de

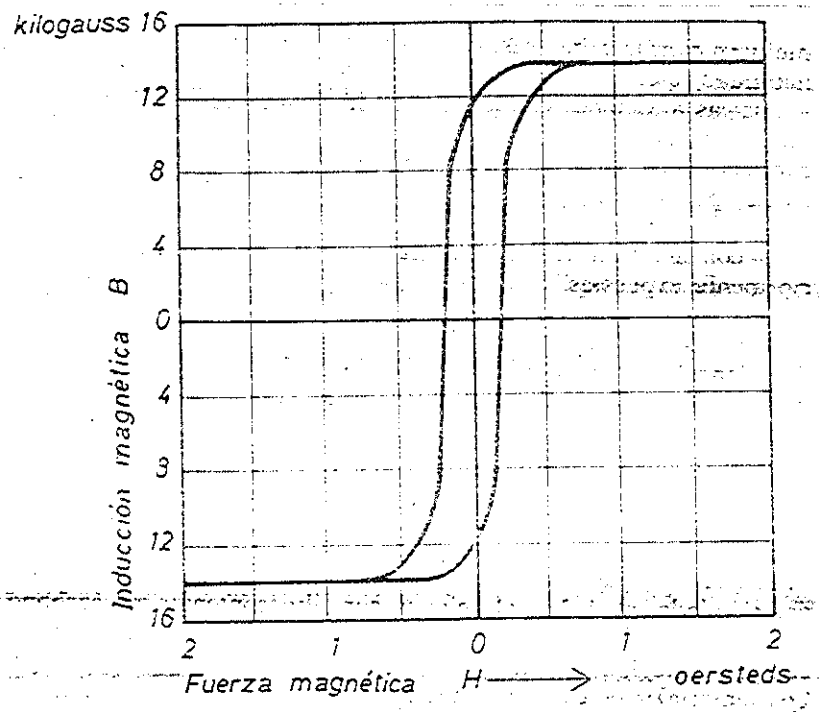


Fig. 117. — Ciclo de histéresis típico de un material magnéticamente blando.

dicho ciclo es proporcional a estas pérdidas. Si a esto se añade que, por lo general, los materiales magnéticamente blandos tienen alta permeabilidad, se comprenderá que su campo de aplicación es muy extenso y que el estudio de estos materiales es de gran importancia para los profesionales de la Electrotecnia.

Casi todos los materiales magnéticamente blandos empleados industrialmente, son aleaciones binarias de las clases siguientes:

1. Aleaciones hierro-carbono
2. Aleaciones hierro-silicio
3. Aleaciones hierro-níquel
4. Aleaciones hierro-cobalto
5. Aleaciones hierro-aluminio

Además de estas aleaciones binarias, se utilizan también otras de tres o más elementos, que tienen propiedades magnéticas similares a las anteriores, aunque los elementos adicionales suplementarios

mejoran ciertas características del material, como resistividad, maquinabilidad, etc.

De las aleaciones citadas, las de hierro-carbono actúan como materiales magnéticamente blandos cuando el contenido de carbono es pequeño y como materiales magnéticamente duros en el caso contrario, por lo que, para su estudio, habrá que hacer la correspondiente distinción.

A continuación se describen las más interesantes aleaciones anteriormente expuestas.

Aleaciones hierro-carbono magnéticamente blandas

La adición de carbono al hierro puro aumenta la resistividad, disminuye la permeabilidad, baja el punto de saturación y aumenta la fuerza coercitiva y la retentividad del material. Las aleaciones de hierro con bajo contenido de carbono son materiales magnéticamente blandos y se emplean en chapas magnéticas y para cerrar el circuito magnético de las máquinas eléctricas (carcasas de fundición, de acero colado, etc.). Las aleaciones con alto contenido de carbono se consideran materiales magnéticamente duros, ya que su fuerza coercitiva resulta importante, y se estudiarán en un próximo parágrafo. Los materiales de este tipo más empleados por sus propiedades magnéticas, son los siguientes:

a) Hierro dulce
b) Acero dulce
c) Fundición de hierro
d) Acero colado
e) Acero forjado

El *hierro dulce* o *pudelado* se define como un material ferroso, constituido por la solidificación de una masa de partículas pastosas de hierro metálico altamente refinado a las cuales, sin fusión posterior, se incorpora cierta cantidad de escoria fina, distribuida uniformemente. Por lo tanto, se trata de un material esencialmente diferente del hierro puro, o del acero obtenido por procedimientos de fusión. Las pequeñas inclusiones de escoria determinan las características del hierro dulce. En forma de barras, se emplea para la construcción de núcleos de relés, contactores, etc., de corriente continua, para ello debe ser recocido preferentemente en atmósfera de hidrógeno después de las distintas operaciones que le dan su forma definitiva; de esta forma, la experiencia demuestra que se reducen las pérdidas por histéresis y se evita el envejecimiento, es

decir, la pérdida de las propiedades magnéticas con el tiempo. El hierro dulce para aplicaciones magnéticas contiene una pequeña proporción de carbono (hasta un 0,5 %) y, a veces, silicio (hasta 3 %) que favorece las propiedades magnéticas, cobre (hasta 0,5 %) para aumentar su resistencia a la corrosión, etc. El azufre, fósforo y oxígeno tienen efectos perjudiciales para las propiedades magnéticas y debe reducirse su contenido hasta los límites más bajos posibles.

El *acero dulce*, es decir, con pequeño contenido de carbono (de 0,10 a 0,20 %) tiene propiedades magnéticas comparables a las del hierro dulce y el acero colado. Se utiliza para la fabricación de chapas magnéticas de calidad ordinaria destinadas a pequeños transformadores, máquinas eléctricas de pequeña potencia, etc. Ha sido casi totalmente sustituido en las demás aplicaciones, por el acero al silicio (del que se hablará más adelante), ya que el acero dulce tiene mayores pérdidas por histéresis y un envejecimiento más acusado que los correspondientes al acero al silicio.

La *fundición de hierro* es magnéticamente inferior al hierro dulce pero se emplea más por la facilidad de moldearla para obtener formas complejadas; de esta forma, se utiliza para carcasas de máquinas eléctricas, rotores de pequeños generadores, etc. La permeabilidad disminuye con la presencia de carbono; se considera que tiene buenas propiedades magnéticas si contiene de 3 a 4,5 % de carbono, de cuya proporción, el 0,2 a 0,8 % esté en forma combinada. La *fundición maleable*, conserva las buenas propiedades típicas de la fundición ordinaria: facilidad de moldeo, resistencia a la oxidación, etc., pero con mejores propiedades mecánicas sobre todo en lo que se refiere a su tenacidad y se obtiene variando la composición de la fundición ordinaria y sometiéndola a tratamientos térmicos especiales: la fundición maleable es magnéticamente superior a la fundición ordinaria, por tener menor contenido de carbono y por el tratamiento térmico al que se la somete.

El *acero colado* se emplea en aquellas partes de los circuitos magnéticos de las máquinas eléctricas que, estando sometidos a flujos magnéticos uniformes y continuos, requieren una elevada resistencia mecánica. Para tener buenas propiedades magnéticas, la composición del acero colado debe limitarse a los siguientes valores:

Carbono combinado	0,25 %
Silicio	0,20 %
Manganeso	0,50 %
Fósforo	0,08 %
Azufre	0,05 %

Cuanto menor es el porcentaje de impurezas, tanto mejores son las propiedades magnéticas del material. El recocido mejora estas propiedades magnéticas. El acero colado tiene varias ventajas sobre la fundición de hierro: la permeabilidad es semejante, pero las secciones son menores y el volumen ocupado es menor también; con el empleo de este material, se pueden obtener los núcleos polares, constituyendo conjunto con la culata de la máquina. Ha sustituido, en muchos casos, a la fundición de hierro en la construcción de carcasas, núcleos polares, etc., de máquinas eléctricas. Su principal inconveniente es que, al fundirlo, se pueden producir sopladuras o grietas, que deben evitarse, ya que reducen considerablemente su permeabilidad magnética.

El *acero forjado*, con pequeño contenido de carbono, se hace compacto y homogéneo y sus propiedades magnéticas son muy estables. Se considera un material de buena calidad magnética cuando su composición tiene las siguientes limitaciones:

Carbono combinado	0,15 %
Silicio	0,06 %
Manganeso	0,4 %
Fósforo	0,04 %
Azufre	0,03 %

Naturalmente, las propiedades magnéticas del acero forjado son tanto mejores cuanto menor es el contenido de los elementos citados.

La forja y el trabajo en general de las piezas de máquinas eléctricas construidas de acero forjado resultan costosos, pero este costo está suficientemente compensado con las excelentes cualidades mecánicas obtenidas. La resistencia mecánica de estas piezas es muy elevada, por lo que, cuando se trata de órganos de máquinas sometidos a elevadas velocidades periféricas (rotores de turbogeneradores, volantes, núcleos de polos salientes, ejes, etc.) se emplea siempre el acero forjado.

En la figura 118 se representan las curvas de magnetización de las aleaciones hierro-carbono estudiadas en el presente parágrafo.

Aleaciones hierro-silicio

La adición de silicio al hierro permite obtener una importante reducción de las pérdidas en el hierro, lo que es efecto de dos causas:

a) por una parte, el sili. o reacciona con las impurezas, que pueden eliminarse mediante la escoria, con el consiguiente aumento de la permeabilidad y reducción de las pérdidas por histéresis.

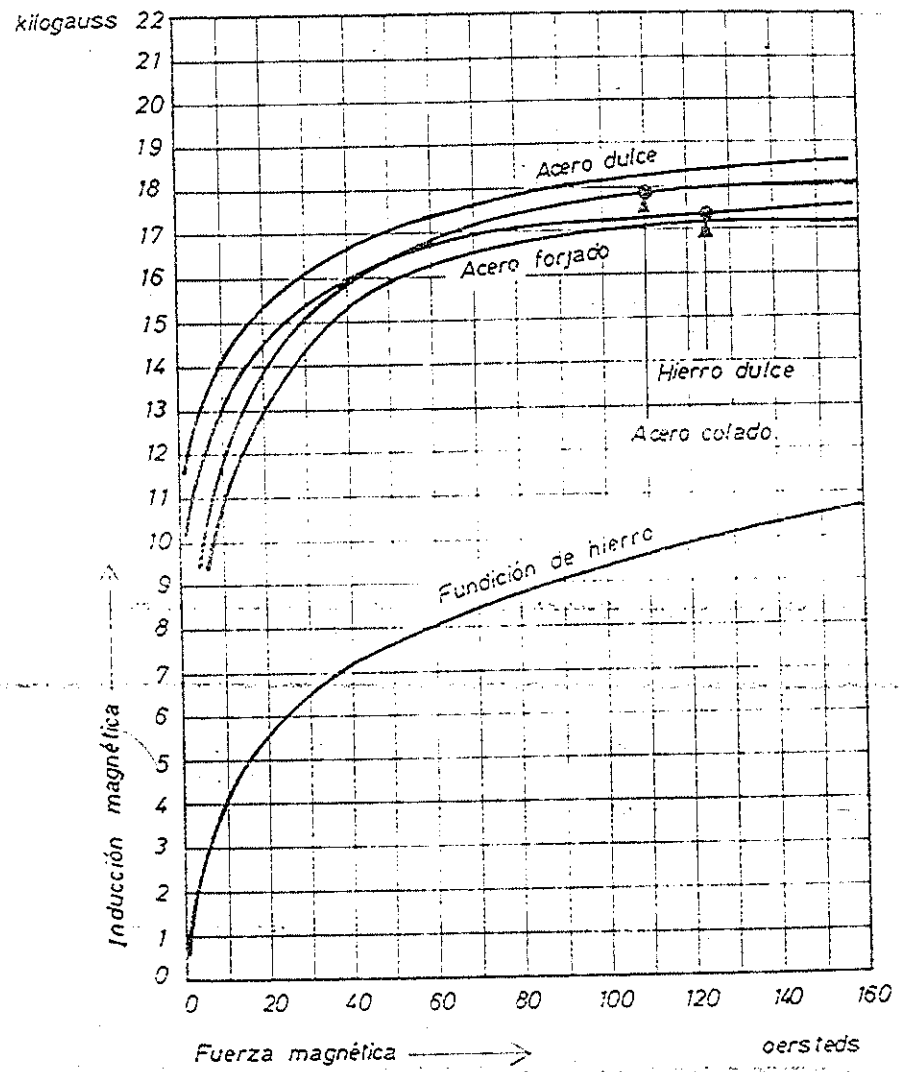


Fig. 118. — Curvas de magnetización de algunas aleaciones hierro-carbono magnéticamente blandas.

b) por otra parte, la presencia del silicio hace que estas aleaciones tengan mayor resistividad eléctrica que las aleaciones hierro-carbono, con la consiguiente reducción de las pérdidas por corrientes parásitas.

El mayor inconveniente de las aleaciones hierro-silicio es que las propiedades anteriormente citadas tienen valores tanto más interesantes cuanto mayor es el contenido de silicio, pero la fragilidad de la aleación aumenta con este contenido, lo que limita el porcentaje de silicio a un 5 % como máximo y esto aún para dispositivos estáticos (por ejemplo, transformadores), ya que en las máquinas rotativas el contenido de silicio ha de ser menor debido, precisamente, a la fragilidad de las aleaciones con alto contenido de silicio. También sucede que la inducción de saturación disminuye si aumenta el porcentaje de silicio de la aleación.

A pesar de los inconvenientes apuntados, actualmente se considera que las aleaciones hierro-silicio constituyen los mejores materiales para la construcción de chapas magnéticas para transformadores, generadores, motores, etc., destinados a funcionamiento continuo, ya que, como se ha dicho anteriormente, las pérdidas totales son menores que en las aleaciones hierro-carbono y, además, su envejecimiento es prácticamente nulo. Las chapas magnéticas de hierro-silicio de alta calidad, fabricadas generalmente en hornos básicos, tienen pocas impurezas:

Carbono	menos de 0,07 %
Azufre	menos de 0,025 %
Fósforo	menos de 0,025 %
Manganeso	menos de 0,25 %

Las chapas magnéticas de aleación hierro-silicio se fabrican de diferentes espesores, empleándose más frecuentemente la de 0,35 mm de espesor para los núcleos magnéticos de transformadores, y la de 0,5 mm de espesor para los núcleos magnéticos de máquinas eléctricas rotativas.

La fabricación de chapas magnéticas ha sido normalizada en los diversos países y los datos magnéticos publicados por los diferentes fabricantes no difieren sensiblemente, si se comparan clases equivalentes. La práctica comercial es de clasificar las chispas de acuerdo con su contenido de silicio a partir de 5 % (a veces de 6,5 %) hasta el acero dulce ordinario, que solamente contiene rastros de silicio. De esta forma, se han establecido cinco clases normales de chapa para los aparatos de potencia y varias clases con pérdidas más reducidas, para aplicaciones especiales. Las cinco clases normales a las

que anteriormente hemos hecho referencia son, por orden de mejor a peor calidad:

1. *Chapa de transformador.* Contenido de silicio, de 4 a 5 % y pérdidas reducidas. Esta clase es relativamente dura y quebradiza, por lo que solamente se emplea en dispositivos estáticos (transformadores) y, en ningún caso, para máquinas eléctricas rotativas.

2. *Chapa de dinamo.* Contenido de silicio, de 3 a 4 % y pérdidas algo mayores que en las anteriores. Se utilizan, sobre todo, en los circuitos magnéticos de las máquinas eléctricas rotativas de alta calidad.

3. *Chapa de motor.* Contenido de silicio, alrededor de 2,5 % y pérdidas algo mayores que en las anteriores. Son las más utilizadas en los circuitos magnéticos de motores de inducción de mediana y gran potencia.

4. *Chapa magnética.* Contenido de silicio, alrededor de 1 % y pérdidas mayores que en las anteriores. Se emplean en los motores de corriente alterna de pequeña potencia.

5. *Chapa de inducido.* Contenido de silicio, alrededor de 0,5 % y pérdidas mayores que en las anteriores. Se utilizan en los inducidos de máquinas de corriente continua de pequeña potencia.

En las figuras 119 a 123 se expresan las curvas de magnetización para las cinco clases de chapa citadas anteriormente, que deben considerarse típicas, ya que hay variaciones normales en cada clase. Téngase en cuenta que, como se ha dicho anteriormente, a mayor contenido de silicio, menores pérdidas en el hierro y menor inducción máxima, lo que reflejan suficientemente las curvas correspondientes. En la figura 124, se muestran las curvas típicas de pérdidas para diferentes tipos de chapas magnéticas de aleación hierro-silicio, de 0,35 mm de espesor.

Las pérdidas en el hierro aumentan también con el espesor de las chapas, la inducción, la frecuencia, y los esfuerzos mecánicos a que están sometidas. La figura 125 representa las pérdidas de una chapa de transformador de alta calidad, de 0,35 mm de espesor, a diferentes frecuencias.

Es muy importante resaltar que en los procesos de fabricación de estas aleaciones deben eliminarse, en lo posible, las impurezas perjudiciales (azufre, fósforo, etc.) que influyen negativamente en las

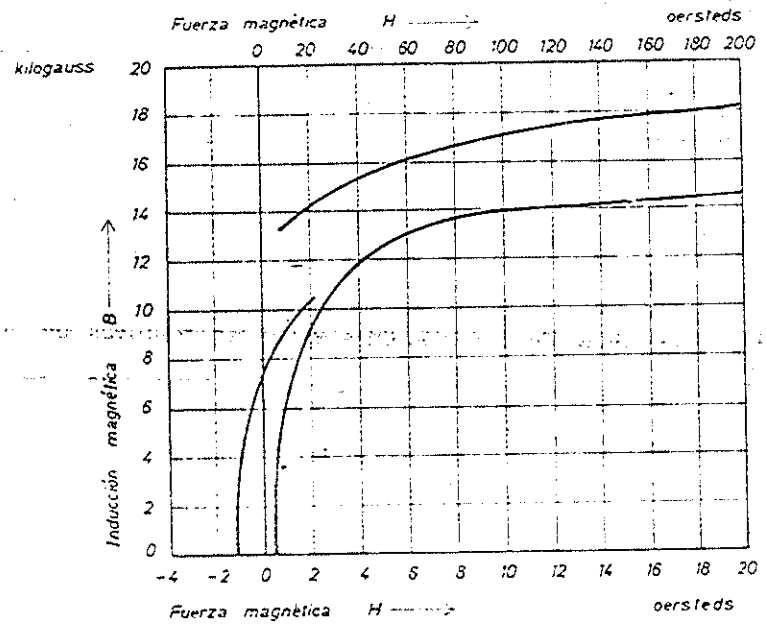


Fig. 119.—Curva de magnetización de la aleación hierro-silicio, con 4 a 5 % de silicio (chapa de transformador).

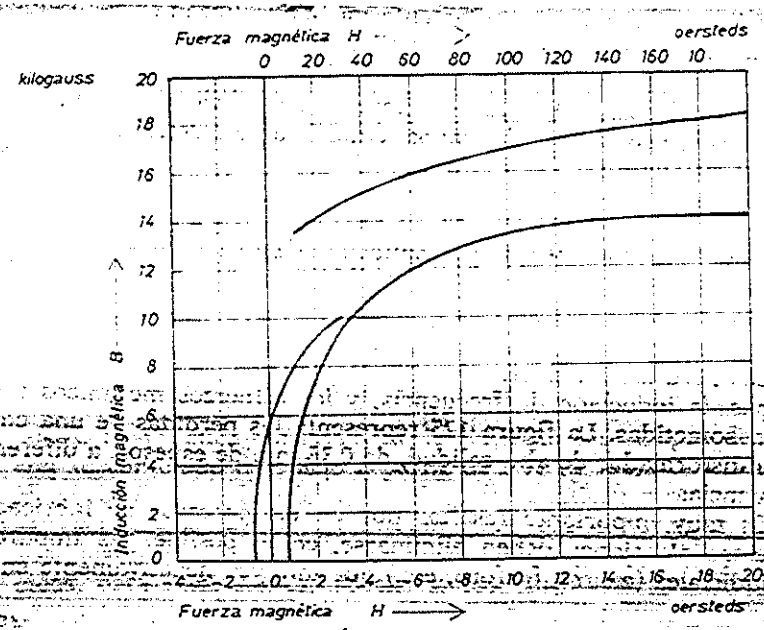


Fig. 120.—Curva de magnetización de la aleación hierro-silicio, con 3 a 4 % de silicio (chapa de dinamo).

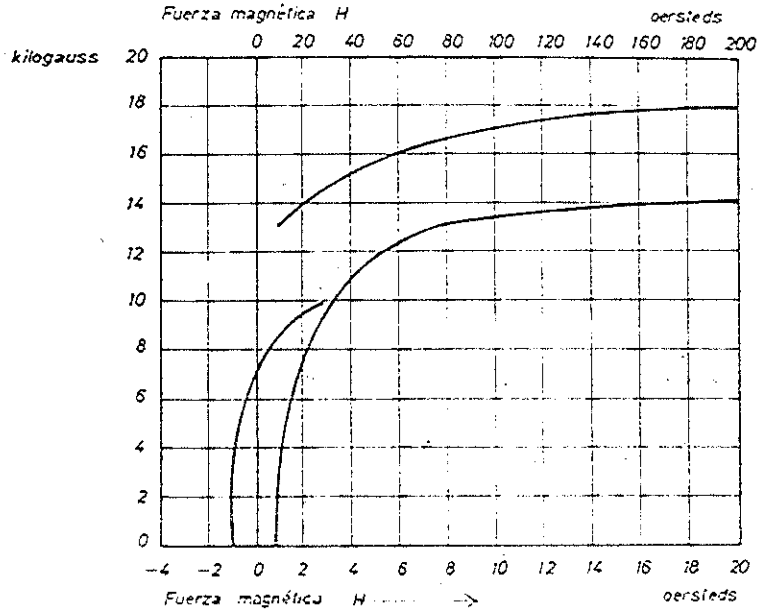


Fig. 121.—Curva de magnetización de la aleación hierro-silicio, con 2,5 % de silicio (chapa de motor).

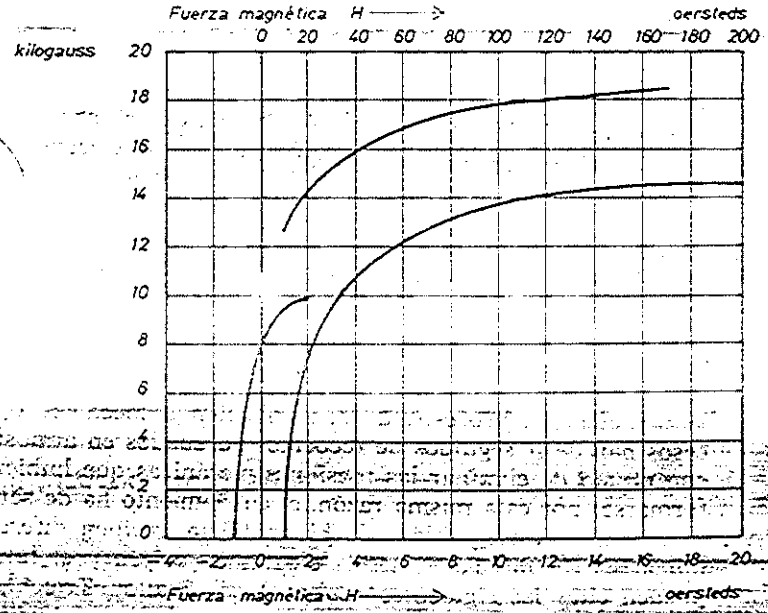


Fig. 122.—Curva de magnetización de la aleación hierro-silicio, con 1 % de silicio (chapa magnética).

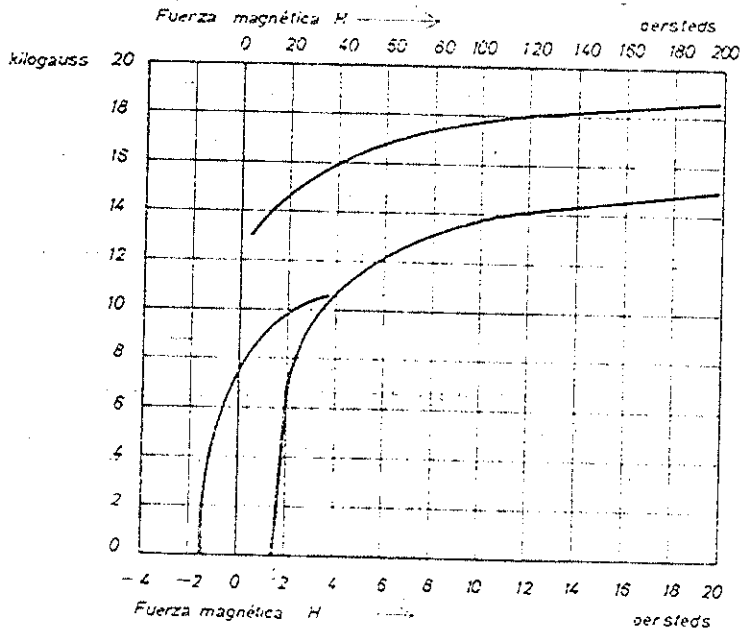


Fig. 123.—Curva de magnetización de la aleación hierro-silicio, con 0,5% de silicio (chapa de inducido).

propiedades magnéticas. Para su producción en bruto, la fusión y afino de estas aleaciones se realiza en hornos eléctricos, colándose posteriormente en lingoteras; los lingotes obtenidos se transforman, por laminación, en chapas gruesas. Por medio de sucesivos plegados, seguidos de laminación en caliente y recocidos intermedios en paquetes de ocho capas, se reducen a espesores comprendidos entre 0,35 y 0,76 mm. Posteriormente, estos paquetes se cizallan para convertirlos en hojas separadas, que se someten a una operación de recocido en atmósfera controlada, con lo que se eliminan tensiones mecánicas y se favorece el crecimiento del grano. Si estas hojas han se someterse a procesos de conformacion o mecanizado, tales procesos han de ir seguidos de recocidos adecuados en atmósfera inerte, con objeto de eliminar las tensiones mecánicas que hubieran podido formarse; por esta misma razón, el enfriamiento ha de ser lento.

Las chapas magnéticas de hierro-silicio, reciben diferentes denominaciones comerciales, según el país de origen y el fabricante; se pueden citar las siguientes: Lohys, Losil, Stalloy, Transil, etc.

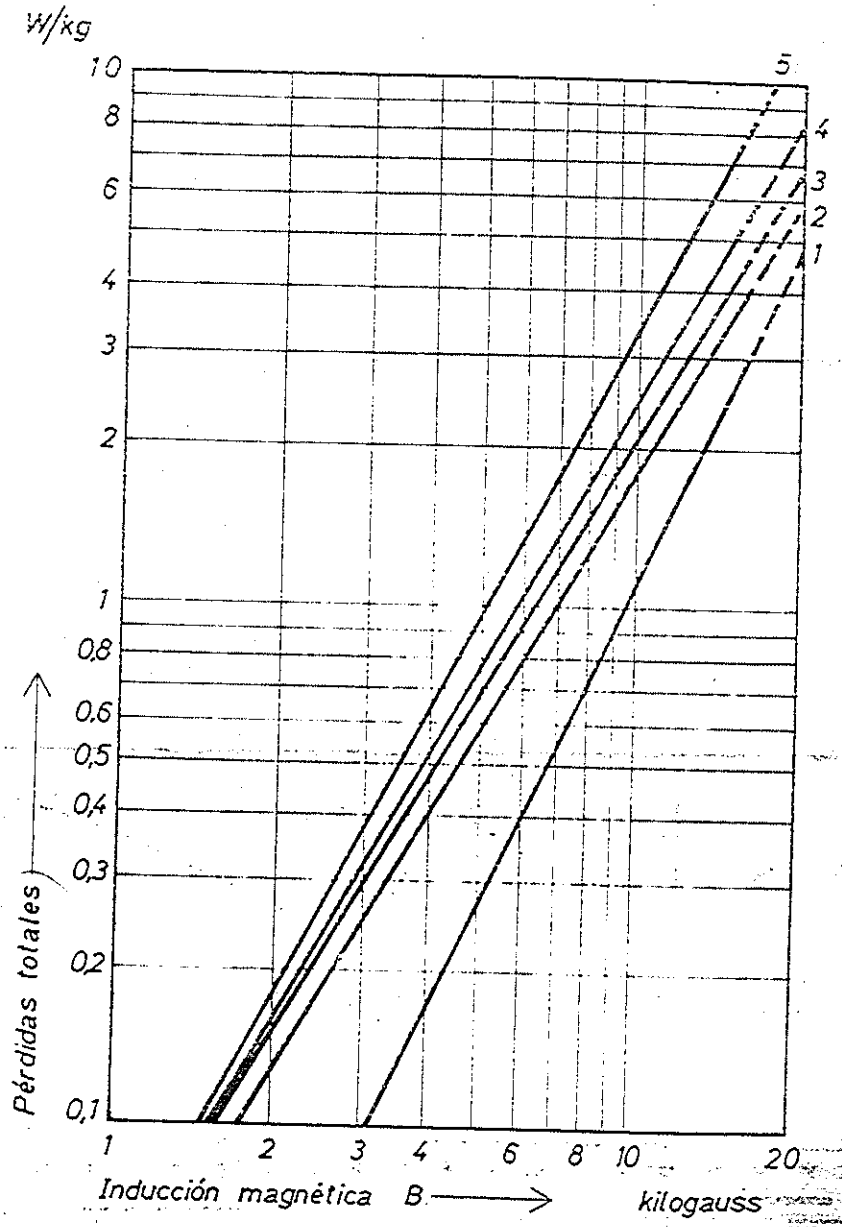


Fig. 124.—Curvas de pérdidas totales de las aleaciones hierro-silicio (chapa de 0,35 mm). 1—Chapa de transformador. 2—Chapa de dinamo. 3—Chapa de motor. 4—Chapa magnética. 5—Chapa de inducido.

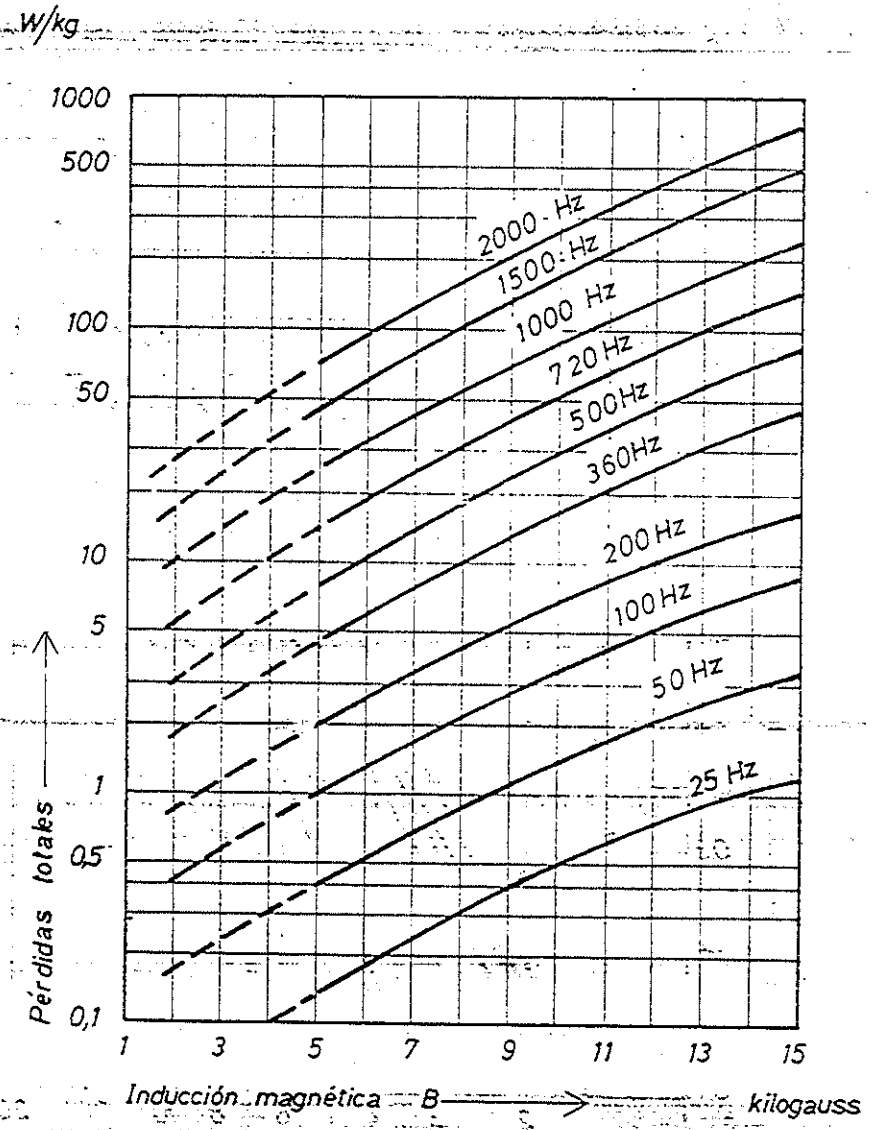


Fig. 125.—Curva de pérdidas totales, en función de la frecuencia, de una chapa de transformador de 0,35 mm.

Aleaciones hierro-silicio de grano orientado

Hasta hace algunos años, la mayor parte de las aleaciones hierro-silicio para aplicaciones magnéticas se producían por laminación en caliente, ~~tal como hemos visto en el párrafo anterior.~~ Pero en los últimos años se han introducido grandes mejoras en la fabricación con laminados en frío, en lugar de la laminación en caliente. Como sucede en la mayoría de los materiales magnéticos, los cristales estructurales de estas aleaciones se magnetizan más rápidamente según uno de los ejes cristalográficos, por lo que la laminación en frío y el proceso térmico subsiguiente se efectúan de forma que la dirección de más fácil magnetización de los cristales coincida en lo posible con la dirección de la laminación. El material preparado de esta forma se denomina de *grano orientado;* los materiales de grano orientado tienen mayor permeabilidad y menores pérdidas por histéresis. No obstante, hay que tener en cuenta, que el aumento de permeabilidad solamente es efectivo cuando la chapa se magnetiza en la dirección en que es laminada mientras que en las demás direcciones, la permeabilidad queda disminuida, como puede comprobarse en la figura 126 donde se expresan las permeabilidades longitudinal y transversal de una chapa de hierro-silicio al 3 % de grano orientado, comparadas con las mismas permeabilidades de una chapa de las mismas características, pero laminada en caliente; nótese que la permeabilidad longitudinal de la chapa de grano orientado es bas-

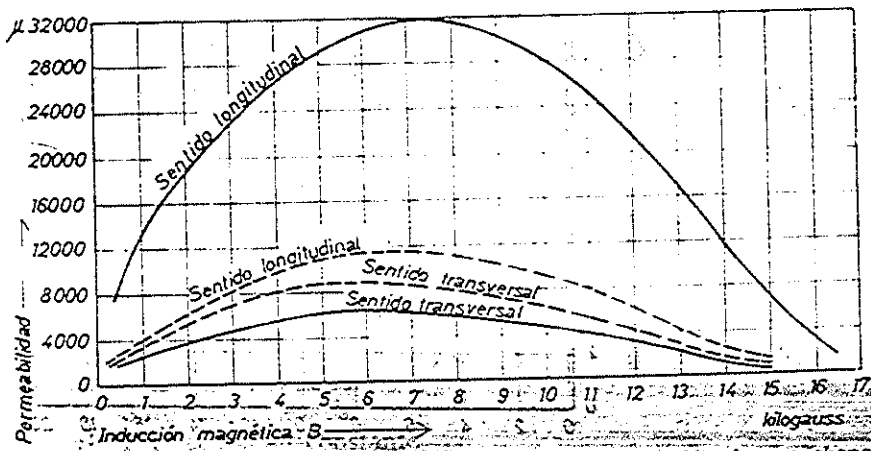


Fig. 126.—Curvas de permeabilidad en función de la inducción de una chapa de hierro-silicio de grano orientado. Línea llena—Chapa de hierro-silicio con 3 % de silicio y grano orientado. Línea de trazos—Chapa de hierro-silicio con 3,5 % de silicio y laminada en caliente.

tante mayor que la correspondiente a la chapa laminada en caliente, mientras que su permeabilidad transversal es algo menor.

El proceso de fabricación de este tipo de chapa se realiza a partir de materiales de gran pureza y composición bien definida, con estructura de grano fino, susceptible de crecer. Se aísla un cristal con dirección privilegiada previamente elegida y se desarrolla la cristalización a partir de este cristal, haciendo pasar la chapa a través de un horno, cuya temperatura se eleva bruscamente a valores muy altos, de forma que sea continuo el crecimiento de los cristales. Cuando la magnetización se realiza a lo largo de la dirección del laminado, pueden conseguirse permeabilidades del orden de 100 000.

Se fabrican aleaciones de hierro-silicio de grano orientado, con contenidos de silicio de hasta 3,5 % y varios espesores. Las de mayor espesor (hasta 0,5 mm) se emplean en los circuitos magnéticos de

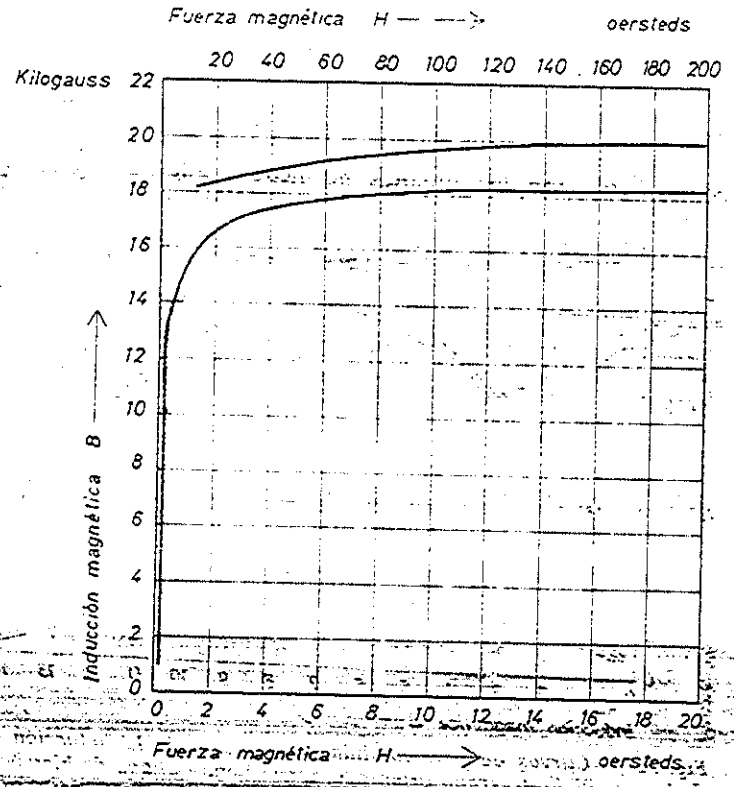


Fig. 127.—Curva de magnetización de una chapa magnética de hierro-silicio de grano orientado.

transformadores de potencia que trabajan en la gama de frecuencias industriales y donde tienden a sustituir, cada vez más, a las chapas de hierro-silicio laminadas en caliente, debido a sus menores pérdidas por histéresis. Las chapas de espesores menores se emplean en aplicaciones de electrónica y de telecomunicación, ya que en las altas frecuencias, las pérdidas menores resultan muchas veces determinantes. Las aleaciones de hierro-silicio de grano orientado no suelen emplearse en máquinas eléctricas rotativas, ya que en estas máquinas las propiedades magnéticas direccionales no tienen importancia de consideración.

Evidentemente, en todas las aplicaciones de las aleaciones de grano orientado, la magnetización debe efectuarse en el sentido de la laminación para aprovechar sus propiedades direccionales por la orientación de los granos; este factor ha de tenerse en cuenta cuando se deben proyectar circuitos magnéticos construidos con estas aleaciones, en los que se debe procurar que el recorrido de los flujos magnéticos coincida con la dirección en que las propiedades magnéticas son mejores.

En la figura 127 se ha trazado la curva de magnetización de una chapa magnética de hierro-silicio de grano orientado.

Las chapas magnéticas de grano orientado reciben diversas denominaciones comerciales, según el país de origen y el fabricante; podemos citar las siguientes: Alphasil, Hipersil, Imphysil, Unisil, Hyperm, Transcor, Crystalloy, etc.

Aleaciones hierro-níquel

Así como las aleaciones hierro-silicio, estudiadas en el parágrafo anterior, son las más utilizadas en aplicaciones generales (circuitos magnéticos de transformadores, máquinas eléctricas, relés, etc.), para aplicaciones especiales, las más empleadas son las aleaciones hierro-níquel. Efectivamente, el níquel, aleado con el hierro en varias proporciones, constituye un conjunto de aleaciones, con gran diversidad de propiedades magnéticas; entre estas aleaciones se incluyen algunas que tienen alguna de las siguientes propiedades determinantes:

a) Alta permeabilidad.
b) Saturación elevada.
c) Permeabilidad constante.
d) Resistividad elevada.
e) Imanación dependiente de la temperatura.
f) Magnetostricción especial.

Además y en las aleaciones con un contenido de níquel próximo al 50 % se han podido obtener, propiedades magnéticas direccionales, es decir, que se trata de materiales magnéticos de grano orientado: mediante una gran pureza de los materiales básicos y adecuados tratamientos térmicos se puede conseguir una orientación selectiva de los granos, en dos direcciones privilegiadas sobre la superficie de la chapa, una de ellas paralela a la dirección del laminado y otra perpendicular a esta dirección; se obtienen de esta forma, materiales de muy alta permeabilidad, ciclo de histéresis rectangular y pequeña fuerza coercitiva. Aún se consiguen mejores propiedades con materiales de grano orientado en una sola dirección; esto se consigue recociendo una chapa de grano orientado en dos direcciones, en presencia de un campo magnético paralelo a la dirección del laminado y enfriando, también en presencia de este campo, desde temperaturas superiores a su punto de Curie. Después de este tratamiento, todos los granos quedan orientados en la dirección privilegiada más próxima a la del campo magnético aplicado; de esta forma, se obtienen ciclos de histéresis muy rectangulares, con campos coercitivos y pérdidas por histéresis muy pequeños.

De una manera general, durante la fabricación de las aleaciones hierro-níquel debe evitarse que existan impurezas perjudiciales (carbono, azufre, oxígeno, etc.), por lo que los elementos que constituyen estas aleaciones habrán de seleccionarse libres de estas impurezas.

La fusión se realiza en hornos eléctricos de inducción de alta frecuencia y atmósfera controlada. El material fundido se cuela en lingotes que, después de eliminados los defectos e impurezas de superficie, se someten a laminado, transformándose en chapas, cintas, tiras, etc. La primera laminación se hace en caliente y después se realizan varias pasadas en frío. Es muy importante que, durante estas operaciones, el material no esté expuesto a la acción de ambientes contaminantes.

Aunque estas aleaciones son relativamente plásticas y, por consiguiente, las operaciones anteriores no provocan tensiones mecánicas de elevado valor, dada la influencia de estos factores en las propiedades magnéticas, después de los procesos mecánicos descritos anteriormente, se someten estas aleaciones a un tratamiento de recocido definitivo, a elevada temperatura y dentro de atmósfera protectora.

Los espesores normales de las chapas están comprendidos entre 0,10 y 0,38 mm y los de las cintas, entre 0,0125 y 0,025 mm.

Para las aplicaciones de las chapas y cintas en corriente alterna, es necesario que queden aisladas entre sí convenientemente, para reducir en lo posible las pérdidas por corrientes parásitas. En bajas frecuencias, basta con permitir una ligera oxidación superficial, aprovechando el calor del último recocido y bajo la acción de la atmósfera (enfriamiento al aire), para altas frecuencias suele emplearse el recubrimiento con una capa de barniz, lo que provoca dificultades en el plegado de la chapa y, sobre todo, si es necesario algún tratamiento térmico después del ensamblado de las chapas, en cuyo caso, el barniz no resistirá las altas temperaturas de este tratamiento: en estos casos, se realiza el recubrimiento mediante una capa de material refractario (por ejemplo, el óxido de magnesio), con lo que la temperatura necesaria para el tratamiento térmico no afecta a este recubrimiento.

En aplicaciones de corriente continua, las piezas de estas aleaciones se obtienen macizas por forja o mecanizado. También en estos casos se efectúa el recocido después de los procesos de conformación, con objeto de eliminar las tensiones mecánicas. Como los tratamientos térmicos aplicados a piezas de grandes dimensiones, provocan heterogeneidad en las estructuras, con lo que quedarían desfavorablemente afectadas las propiedades magnéticas, esta circunstancia limita el tamaño de las piezas macizas que pueden fabricarse con aleaciones hierro-níquel.

A continuación se reseñan algunos de los materiales magnéticos fabricados a base de aleaciones de hierro-níquel, clasificándolos de acuerdo con sus propiedades determinantes, citadas en un párrafo anterior:

Aleaciones hierro-níquel de alta permeabilidad magnética. Un material con alta permeabilidad magnética, alcanzará muy rápida-

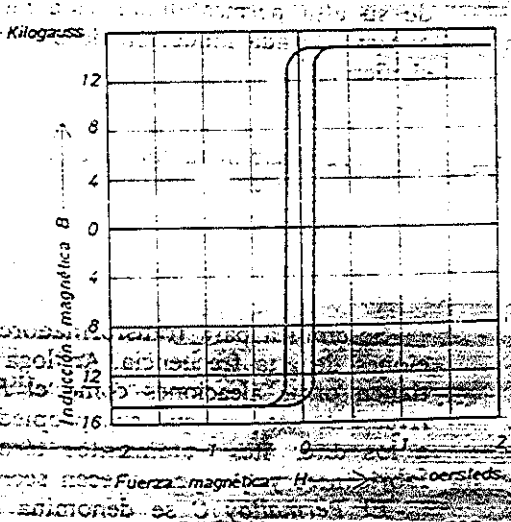


Fig. 128.—Ciclo de histéresis típico de un material magnéticamente blando, de alta permeabilidad.

mente el valor de saturación; su ciclo de histéresis será, por lo tanto, rectangular y de área muy pequeña, es decir, estrecho (Fig. 128). Es decir, que las pérdidas por histéresis, son proporcionales al área del ciclo, serán también pequeñas.

La aleación hierro-níquel más conocida con estas propiedades es el *Permalloy 78* o *Permalloy A* estudiado en América, que contiene 21,5 % de hierro y 78,5 % de níquel; esta aleación tiene las siguientes características magnéticas:

Permeabilidad inicial	12 000
Permeabilidad máxima	95 000
Inducción de saturación	10 500 gauss
Inducción remanente	5 000 gauss
Fuerza coercitiva	0,0375 oersteds
Resistividad eléctrica	0,21 Ω mm²/m

Para que se desarrollen estas propiedades, el material necesita un tratamiento especial; después del recocido usual a temperaturas próximas a 1 000° C, debe ser enfriado rápidamente.

Posteriormente, se han desarrollado otras aleaciones *Permalloy* denominadas B, C, D, etc., o bien con un número que indica el contenido de níquel, algunos de estos nuevos materiales, ya no son aleaciones binarias, sino que contienen tres o más elementos de aleación, aunque siempre a base de hierro y níquel. Entre los materiales de este grupo, pueden citarse los siguientes:

El *Permalloy B* contiene 50 % de níquel y 50 % de hierro; además de su alta permeabilidad, esta aleación está caracterizada también por su elevada inducción de saturación; sus características, son las siguientes:

Permeabilidad inicial	2 800
Permeabilidad máxima	75 000
Inducción de saturación	16 000 gauss
Inducción remanente	5 000 gauss
Fuerza coercitiva	0,048 oersteds
Resistividad eléctrica	0,46 Ω mm²/m

Se emplea para transformadores de pequeña potencia, en aplicaciones de alta frecuencia. Análoga composición que el Permalloy B tienen otras aleaciones como el *Hyperm 50, Permenorm, Laminic, Hiperhik*, etc., aunque sus propiedades difieren del anterior debido a los diferentes tratamientos térmicos a los que los someten sus fabricantes y que permanecen secretos en gran parte.

El *Permalloy C* se denomina también *Permalloy al molibdeno*

porque en su composición entra este metal: 18 % de hierro, 78,5 de níquel, 3 % de molibdeno y 0,5 % de manganeso; de esta forma se consiguen mejorar todas las propiedades magnéticas: más elevada permeabilidad (por lo tanto, menores pérdidas por histéresis), y mayor resistividad eléctrica (por lo tanto, menores pérdidas por corrientes parásitas). Las propiedades de esta aleación, son las siguientes:

Permeabilidad inicial	20 000
Permeabilidad máxima	120 000
Inducción de saturación	8 000 gauss
Inducción remanente	3 500 gauss
Fuerza coercitiva	0,03 oersteds
Resistividad eléctrica	0,60 Ω mm²/m

El *Supermalloy* o *Permalloy al cromo* está constituido por 16,5 % de hierro, 78,1 % de níquel y 2,9 % de cromo y se caracteriza por sus excelentes propiedades magnéticas, tal como puede deducirse del siguiente cuadro:

Permeabilidad inicial	1 600
Permeabilidad máxima	50 000
Inducción de saturación	8 000 gauss
Inducción remanente	3 000 gauss
Fuerza coercitiva	0,0375 oersteds
Resistividad eléctrica	0,26 Ω mm²/m

Aleaciones de composición semejante a la anterior son las denominadas *Rho-Permalloy* (ρ = 0,94 Ω mm²/m) *Calmalloy, Hyperm 766*, etcétera.

Modernamente, y dentro de la gama de aleaciones que estamos estudiando, se ha desarrollado el *Supermalloy*, de extraordinarias propiedades magnéticas y constituido por 15 % de hierro, 79 % de níquel, 5 % de molibdeno y menos de 1 % de manganeso. Las propiedades a que hemos hecho referencia son las que se expresan a continuación:

Permeabilidad inicial	mayor de 150 000
Permeabilidad máxima	mayor de 1 250 000
Inducción de saturación	8 000 gauss
Fuerza coercitiva	0,003 oersteds
Resistividad eléctrica	0,65 Ω mm²/m

Estas propiedades se obtienen por fusión controlada de materiales crudos adecuados, tratamiento térmico en atmósfera de hidrógeno a 1 300° C y enfriamiento a régimen crítico. Esta aleación es de grano orientado y el área de su ciclo de histéresis es muy pequeña. Similar en composición y propiedades es el Ultraperm.

Además de la serie de los Permalloy existen también otras aleaciones, que corresponden a distintos fabricantes, algunas de las cuales ya se han citado al hablar de los Permalloy; todas ellas están caracterizadas, sobre todo, por su alta permeabilidad, aunque algunas de ellas tienen también características de alto punto de saturación, entre estas aleaciones cabe destacar:

El *Mumetal* o *Metalmu*, con propiedades similares al Permalloy A y constituido por 19,5 % de hierro, 75 % de níquel, 4 % de cobre y 1,5 % de cromo; para alcanzar las propiedades óptimas, el material debe reconocerse a 1 100° C en hidrógeno puro seco, durante varias horas y enfriado lentamente. La denominada *Aleación 1 040* es similar en composición y propiedades al Mumetal.

La gama de los *Megaperm* está constituida por varios materiales cuya composición varía: de 25 a 45 de hierro, de 65 a 45 % de níquel y 10 % de manganeso. Están caracterizados por una permeabilidad inicial relativamente baja (4 000 a 6 000), una alta permeabilidad máxima (85 000 a 90 000), inducciones de saturación hasta 9 300 gauss y alta resistividad eléctrica. Análogas en composición y propiedades son las aleaciones denominadas comercialmente como *Nicalloy*, *Permax*, *Hyperm 36*, etc.

Nótese que las aleaciones hierro-níquel de alta permeabilidad están, todas ellas, caracterizadas por su alto contenido de níquel. En los párrafos que siguen, veremos cómo cambian las propiedades de las aleaciones hierro-níquel al disminuir el contenido de níquel.

Aleaciones hierro-níquel de saturación elevada. Cuando el contenido de níquel está comprendido entre 35 % y 50 %, las aleaciones hierro-níquel se caracterizan por una permeabilidad máxima menor que las estudiadas anteriormente, pero con una inducción de saturación bastante más elevada. Por consiguiente, el ciclo de histéresis será redondeado y de un área mayor (Fig. 129), lo que quiere decir que sus pérdidas por histéresis serán también mayores que en el caso anterior. Para una inducción de saturación alta, el máximo relativo de permeabilidad se presenta cuando el contenido de níquel es, aproximadamente, de 45 % y es en esta zona, precisamente, donde se han desarrollado el mayor número de aleaciones que se encuentran en el comercio, caracterizadas por una elevada inducción de saturación.

Al hablar de los Permalloy, en el parágrafo anterior, ya hemos

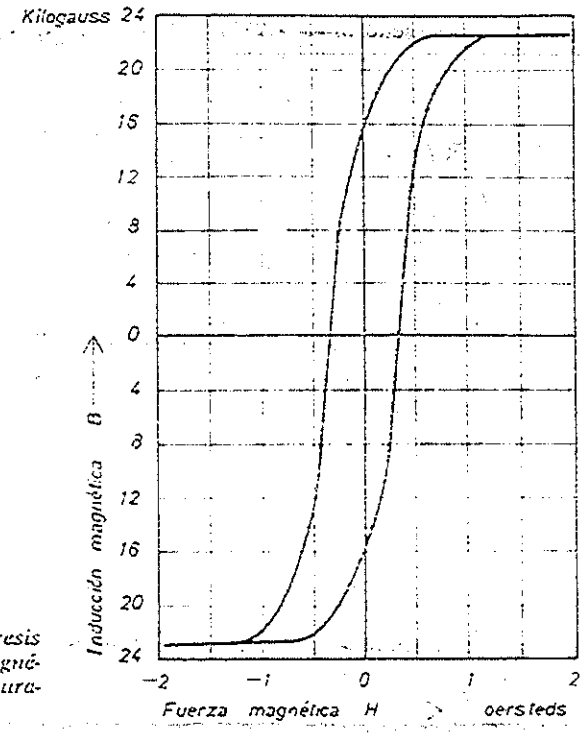


Fig. 129. — Ciclo de histéresis típico de un material magnéticamente blando, de saturación elevada.

visto que el *Permalloy B* (y sus análogos, el *Hyperm 50*, el *Permenorm*, etc.) estaba caracterizado por una permeabilidad máxima relativamente baja (75 000) con una inducción de saturación francamente elevada (16 000 gauss); por consiguiente, los materiales citados deberían haberse incluido más propiamente en el presente parágrafo.

También pueden incluirse las denominadas *Aleaciones Furukawa*, citadas con las letras A, B, C y D y que están constituidas por 15 a 78 % de hierro, 20 a 83 % de níquel, 0,3 a 13,5 % de cromo, 0,5 a 2 % de manganeso, 0,1 a 4 % de silicio y pequeñas proporciones de otros metales, como titanio, cobalto, cobre, etc. Cuanto mayor es la proporción de níquel, mayores son también las permeabilidades inicial y máxima y cuanto menor es la proporción de níquel, mayor resulta la inducción de saturación; las propiedades generales de estas aleaciones, de composición y fabricación aún no bien conocidas, es la siguiente:

Permeabilidad inicial . . .	de 2 500 a 18 800
Permeabilidad máxima . . .	de 21 800 a 142 000
Inducción de saturación . .	de 6 700 a 15 000 gauss
Fuerza coercitiva	de 0,024 a 0,1 oersteds
Resistividad eléctrica . . .	de 0,31 a 0,91 Ω mm²/m

Además de estas propiedades, las aleaciones Furukawa B y C tienen una magnetostricción muy elevadas.

También se pueden citar entre las aleaciones hierro-níquel de elevada saturación, los siguientes materiales:

Monimax (50 % de hierro, 47 % de níquel, 3 % de molibdeno) con una permeabilidad máxima de 45 000 y una inducción de saturación de 15 000 gauss.

Sinimax (54,5 % de hierro, 42 % de níquel, 3,5 % de silicio), con una permeabilidad máxima de 35 000 y una inducción de saturación de 11 000 gauss.

Aleaciones hierro-níquel de permeabilidad constante. Una aleación típica de esta clase es la denominada *Isoperm*, cuyo ciclo de histéresis se representa en la figura 130; está constituida por 50 % de hierro, 35 % de níquel y 15 % de cobre. Su permeabilidad es aproximadamente constante e igual a 100 para valores de la fuerza

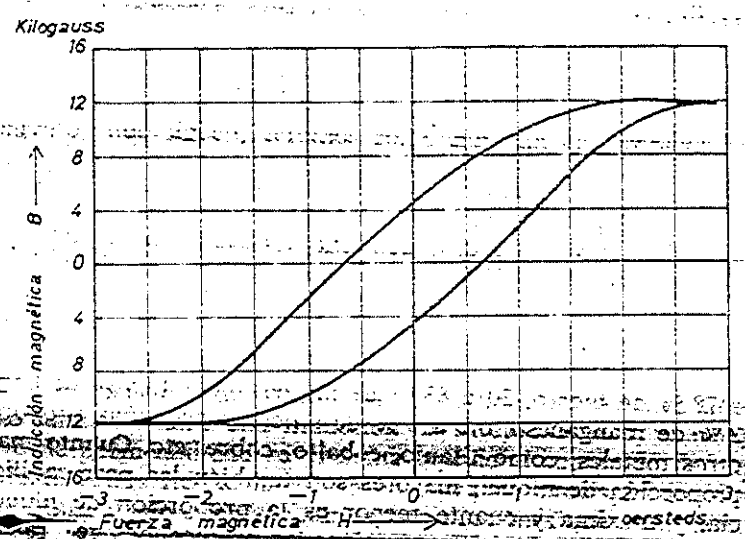


Fig. 130. — Ciclo de histéresis típico de un material magnéticamente blando, de permeabilidad constante.

magnética hasta 100 oersteds. Mediante un laminado enérgico en frío (con reducciones de espesor hasta del 98 %), seguida de un recocido a 1 000° C, y un nuevo laminado suplementario en frío, se crea una dirección de fácil imantación perpendicularmente al plano de la chapa, resultando una estructura de gran permeabilidad en el plano perpendicular al de la chapa y de pequeña permeabilidad en el plano paralelo a ésta. Ya veremos más adelante, en los próximos parágrafos, otras aleaciones de este tipo.

Estos materiales se emplean en la construcción de los núcleos magnéticos de las bobinas de alta frecuencia; en ellos, se renuncia a valores elevados de la permeabilidad, con objeto de que ésta sea constante (para evitar retrasos). Además, las pérdidas han de ser pequeñas en atención a las altas frecuencia de funcionamiento. La pequeña remanencia tiene como consecuencia que la permeabilidad resulte constante.

Aleaciones hierro-níquel de resistividad elevada. Cuanto mayor es la resistividad eléctrica de un material magnético, menores serán las pérdidas por corrientes de Foucault de este material, lo que puede resultar interesante, sobre todo, para aplicaciones de alta frecuencia ya que, como sabemos, dichas pérdidas son proporcionales a la frecuencia. Está demostrado experimentalmente que las aleaciones hierro-níquel, cuyo contenido de este último metal está comprendido entre 35 y 48 % tienen elevada resistividad eléctrica (de 0,8 a 0,9 ohmios mm²/m). Entre estas aleaciones cabe destacar la denominada *Megaperm 4510* (45 % de hierro, 45 % de níquel, 10 % de molibdeno) y cuyas características generales son las siguientes:

Permeabilidad inicial	4 000
Permeabilidad máxima	85 000
Inducción de saturación	9 300 gauss
Fuerza coercitiva	0,05 oersteds
Resistividad eléctrica	0,97 Ω mm²/m

Análogas características y propiedades tienen el *Nicalloy*, el *Hyperm 36* y la *Aleación Furukawa A*.

Añadiendo pequeñas cantidades de otros metales, se puede conseguir que las aleaciones hierro-níquel que estamos estudiando aumenten el valor de la inducción de saturación, manteniendo una elevada conductividad. Anteriormente, y a propósito de las aleaciones hierro-níquel de saturación elevada, se han citado el *Monimax* (50 % de hierro, 47 % de níquel, 3 % de molibdeno) y cuya resistividad es de 0,80 Ω mm²/m, con una inducción máxima de 15 000 gauss, y el *Sinimax* (54,5 % de hierro, 42 % de níquel, 3,5 % de silicio), que

tiene una resistividad de 0,90 Ω mm²/m, con una inducción máxima de 11 000 gauss. Es decir, que estas dos aleaciones son, simultáneamente, de saturación elevada y de resistividad elevada, por lo que resultan muy adecuadas para su empleo en aplicaciones de alta frecuencia.

Aleaciones hierro-níquel con imanación dependiente de la temperatura. Las aleaciones hierro-níquel con contenido de níquel próximo al 30 % tienen un punto de Curie muy bajo, del orden de 100° C, por lo que la imanación de estas aleaciones disminuye notablemente cuando la temperatura se aproxima a dicho punto. Esta propiedad permite la utilización de estas aleaciones como compensadores en sistemas de imanes permanentes o de electroimanes, en los que el campo magnético del entrehierro tienda a disminuir cuando se eleva la temperatura. Para ello, se dispone una plaquita de la aleación compensadora, de forma que derive tanto menos flujo cuanto más elevada sea la temperatura de servicio: de esta forma, se dispone de un flujo magnético prácticamente constante en el entrehierro.

Las aleaciones hierro-níquel sensibles a la temperatura tienen importantes aplicaciones en la compensación de temperatura en los contadores, contactores, relés, reactancias y transformadores. Por lo general, además de hierro y níquel, contienen pequeñas cantidades de otros elementos como silicio, manganeso, cromo, etc. Algunas de estas aleaciones, han sido citadas ya en anteriores apartados ya que, además de su propiedad de ser sensibles a la temperatura, tienen también otras propiedades: de elevada permeabilidad, de saturación elevada, etc. Como ejemplo de estas aleaciones, se puede citar el

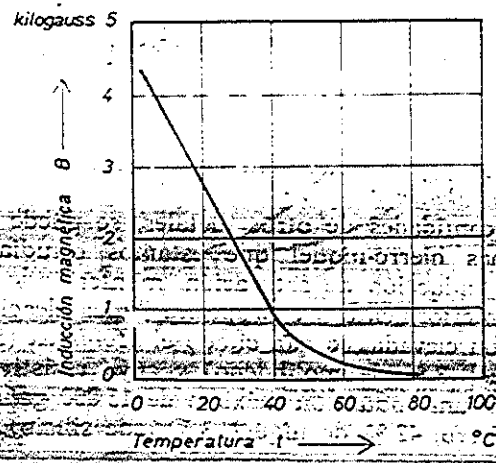


Fig. 131. — Curva de inducción del Thermoperm, en función de la temperatura.

Thermoperm (70 % de hierro, 30 % de níquel); en la figura 131 se puede apreciar la curva de inducción de este material, en función de la temperatura, y para una fuerza magnética de 100 oersteds.

Aleaciones hierro-níquel con magnetostricción especial. En el capítulo anterior se ha definido la magnetostricción. Algunas aleaciones hierro-níquel presentan efectos magnetostrictivos acusados, lo que permite emplearlas en las aplicaciones correspondientes (transductores magnetostrictivos, sonar, etc.). Algunas de estas aleaciones contienen otros elementos, además del hierro y del níquel; se pueden citar las siguientes:

Invar (64 % de hierro, 36 % de níquel). *Glowray* (20 % de hierro, 65 % de níquel, 15 % de cromo), *Cekas* (26,9 % de hierro, 59,9 % de níquel, 11,2 % de cromo, 2 % de manganeso) y las *Aleaciones Furukawa B y C*, que se han definido en un parágrafo anterior.

Aleaciones hierro-cobalto

Existe una gama de aleaciones hierro-cobalto, con contenido de este último metal comprendido entre 30 y 50 %, cuyas principales características magnéticas son, su elevada inducción de saturación, temperatura de Curie muy alta y elevada permeabilidad para campos magnéticos intensos.

El mayor inconveniente de estas aleaciones es su precio, más elevado que el de las aleaciones hierro-níquel, expuestas en el parágrafo anterior. También resulta un gran inconveniente su dificultad de deformación, tanto en frío como en caliente aunque esta dificultad desaparece por adición de vanadio (hasta 2 %) o de cromo (hasta 0,5 %).

Estas aleaciones resultan útiles cuando se desea una elevada inducción de saturación, como sucede en la construcción de piezas polares para electroimanes; con la adición de vanadio pueden trabajarse a máquina e incluso taladrarse después de la operación de laminado en frío, por lo que, en esta forma, han encontrado aplicación en los diafragmas de teléfono.

Como aleación típica de este grupo, citaremos el *Permendur* (50 % de hierro, 50 % del cobalto), que tiene las siguientes características:

Permeabilidad inicial	880
Permeabilidad máxima	10 000
Inducción de saturación	25 700 gauss
Inducción remanente	14 000 gauss
Fuerza coercitiva	1 oersted
Resistividad eléctrica	0,06 Ω mm²/m

Un material de características y composición semejante es el denominado *Hyperm 6050*.

El *Permendur al vanadio*, llamado también *Supermendur* (49 % de hierro, 49 % de cobalto, 2 % de vanadio), tiene las siguientes características:

Permeabilidad máxima	66 000
Inducción de saturación	24 000 gauss
Inducción remanente	21 000 gauss
Fuerza coercitiva	0,26 oersteds

y, además, un ciclo de histéresis prácticamente rectangular.

Es interesante destacar que con las aleaciones hierro-cobalto, se obtienen las más elevadas inducciones de saturación conocidas hasta ahora.

Aleaciones hierro-níquel-cobalto

Estas aleaciones se conocen, en general, con el nombre de *Perminvares* y su característica más interesante es que presentan un doble ciclo de histéresis, según que se imanten, respectivamente, con campos magnéticos pequeños o elevados. Véase por ejemplo en la figura 132 los dos ciclos de histéresis de un Perminvar cuya composición es de 10 % de hierro, 55 % de níquel y 35 % de cobalto, recocido a una temperatura de 900° C. La curva A corresponde a una fuerza magnética de 3,5 oersteds y, en estas condiciones, la inducción máxima que se alcanza es de 2 000 gauss, con una permeabilidad casi constante, ciclo de histéresis en forma de corbata y pérdidas por histéresis extremadamente reducidas. La curva B corresponde a la imanación del material para una fuerza magnética de 10 oersteds, alcanzándose una inducción máxima de 9 200 gauss, obteniéndose entonces un ciclo de histéresis de forma estrangulada, en el que la curva sube recta hacia arriba, tal como puede apreciarse en la figura.

Combinando adecuadamente el contenido de los metales que constituyen estas aleaciones se obtienen materiales de doble ciclo de histéresis, y de características especiales, que resultan, técnicamente, muy interesantes. Por ejemplo, véase en la figura 133 un doble ciclo de histéresis rectangular, obtenido con un Perminvar de la siguiente composición: 20 % de hierro, 35 % de níquel, 45 % de cobalto, recocido a 1 000° C. La curva A corresponde a un campo magnético de 2 oersteds, obteniéndose una inducción máxima de 3 900 gauss; la curva B corresponde a un campo magnético de 10 oersteds, en cuyo caso se obtiene una inducción máxima de 10 000 gauss. En ambos

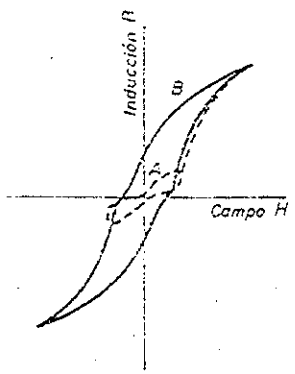


Fig. 132.—Ciclos de histéresis de un Perminvar con 10 % de hierro, 55 % de níquel, 35 % de cobalto. A—Con pequeña fuerza magnética. B—Con elevada fuerza magnética.

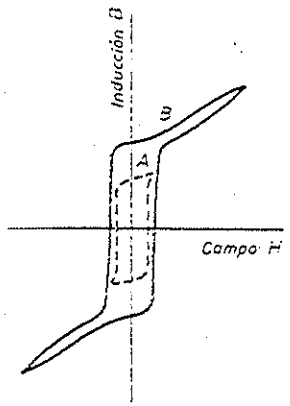


Fig. 133.—Ciclo de histéresis de un Perminvar con 20 % de hierro, 35 % de níquel, 45 % de cobalto. A—Con pequeña fuerza magnética. B—Con elevada fuerza magnética.

casos, se obtiene un ciclo de histéresis aproximadamente rectangular. Se conocen ya unas 70 aleaciones de este tipo, con ciclo rectangular.

Por sus especiales características, las aleaciones hierro-níquel-cobalto, se emplean también en aplicaciones muy especiales. Por ejemplo, cuando se trata de circuitos que requieren una inductancia o una reactancia constantes, se emplean aleaciones de permeabilidad constante, como la de la figura 132. Si lo que se pretende es un efecto de "todo o nada", se utiliza una aleación de ciclo rectangular, como la de la figura 133. En todos los casos, las necesidades del servicio indicarán cual de los dos ciclos de histéresis correspondiente a cada aleación, debe utilizarse.

Consideramos que estas aleaciones resultan muy interesantes para futuras aplicaciones, ya que permiten, a voluntad, modificar las características de inductancia y de reactancia en los circuitos eléctricos, sobre todo, en lo que hace referencia al campo de la alta frecuencia.

Después de recocidas a temperatura conveniente, todas las aleaciones hierro-níquel-cobalto deben someterse a un recalentamiento de 24 horas, como mínimo, y a temperaturas comprendidas entre 400 y 500° C.

Aleaciones hierro-aluminio

Las aleaciones de aluminio con hierro, tienen propiedades similares a las de hierro y silicio, e incluso, las mejoran, en lo que se

refiere a una mayor deformabilidad y mejor resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas. Añadiendo a las aleaciones de hierro-silicio una proporción de aluminio de 0,5 %, este último metal actúa como desoxidante.

Sin embargo, y a pesar de estas interesantes propiedades, las aleaciones de hierro-aluminio, con gran contenido de este metal, no son muy empleadas, a causa del precio del aluminio y de las dificultades que presentan los tratamientos térmicos de estas aleaciones. Se han puesto a punto aleaciones de este grupo como la *Alperm* (84 % de hierro y 16 % de aluminio) y su similar *Alphenol 16*.

En el Japón se ha desarrollado una aleación denominada *Sendust* (85 % de hierro, 9,6 % de silicio, 5,4 % de aluminio), de excelentes propiedades magnéticas, como puede apreciarse a continuación:

Permeabilidad inicial	45 000
Permeabilidad máxima	200 000
Inducción de saturación	10 000 gauss
Fuerza coercitiva	0,05 oersteds
Resistividad eléctrica	0,80 Ω mm²/m

A pesar de estas extraordinarias propiedades (permeabilidad elevada, alta resistividad eléctrica, etc.), el Sendust no se emplea en forma de chapa, ya que resulta muy frágil; a causa de su fragilidad, ha sido producido en polvo y posteriormente aglomerado. De esta forma se utiliza (sobre todo en el Japón) en núcleos magnéticos de transformadores y bobinas de alta frecuencia.

Materiales magnéticamente blandos, a base de polvos aglomerados

El material ideal para núcleos de pequeñas bobinas y de transformadores empleados en aplicaciones de alta frecuencia (telefonía, radio, televisión, etc.) habría de tener características de permeabilidad constante y reducidas pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en el amplio margen de frecuencias que se necesitan en estas aplicaciones. Para estos casos se han preparado materiales pulverizados y posteriormente aglomerados que dan buenos resultados. A continuación se citan algunos de estos materiales:

El *polvo de hierro* aislado y comprimido ha sido empleado para estas aplicaciones. El método de fabricación es el siguiente: el hierro se deposita electrolíticamente, y posteriormente se muele y tamiza, se aísla con goma laca y se prensa en moldes a una presión de 14 000 kg/cm², finalmente se seca en un horno a 125° C y queda en disposición de ser empleado.

También se prepara *polvo de hierro moldeado*, para lo que se parte de hierro pulverizado con granos de unas 10 micras, por procedimientos químicos, y se reviste de una capa de material aislante. El polvo se mezcla entonces con una resina fenólica, para ser comprimido a alta presión, calentado y, de esta forma, baquelizado. El producto resultante es un campo magnéticamente estable, que contiene, en peso, un 90 % de hierro puro. En estas condiciones, puede trabajarse mecánicamente como si se tratara de hierro dulce: es decir, puede tornearse, taladrarse, aserrarse, etc. Este material se emplea para aplicaciones de radiofrecuencia.

El *Permalloy pulverizado* también se emplea para aplicaciones similares a las del hierro pulverizado y lo reemplaza en aplicaciones especiales, tales como la carga inductiva de los cables telefónicos de gran longitud. Las superiores propiedades magnéticas de este material, permite el empleo de núcleos magnéticos más pequeños, reduciendo de esta forma las dimensiones de una bobina de inductancia dada. Sin embargo, resulta necesario aplicar a este material tratamientos térmicos adecuados para obtener las propiedades magnéticas deseadas.

Hemos visto en el parágrafo anterior que el *Sendust* se empleaba pulverizado, debido a su fragilidad; en estas condiciones, encuentra aplicación en los núcleos magnéticos de bobinas y transformadores de circuitos de alta frecuencia.

Resumen de los materiales magnéticamente blandos

Como resumen de los parágrafos anteriores, y para que los lectores puedan comparar las propiedades de los materiales magnéticamente blandos, que se han estudiado hasta ahora, en la página siguiente se exponen en una tabla las características magnéticas de estos materiales.

Como complemento a la tabla anterior, véase en la figura 134 las curvas de magnetismo de algunos de estos materiales, y en la figura 135, las curvas de pérdidas totales en función de la inducción.

Características generales de los materiales magnéticamente duros

Como ya se dijo al principio del presente capítulo, los materiales magnéticamente duros están caracterizados por las siguientes propiedades:

a) Moderada o baja permeabilidad
b) Alta fuerza coercitiva
c) Altas pérdidas por histéresis

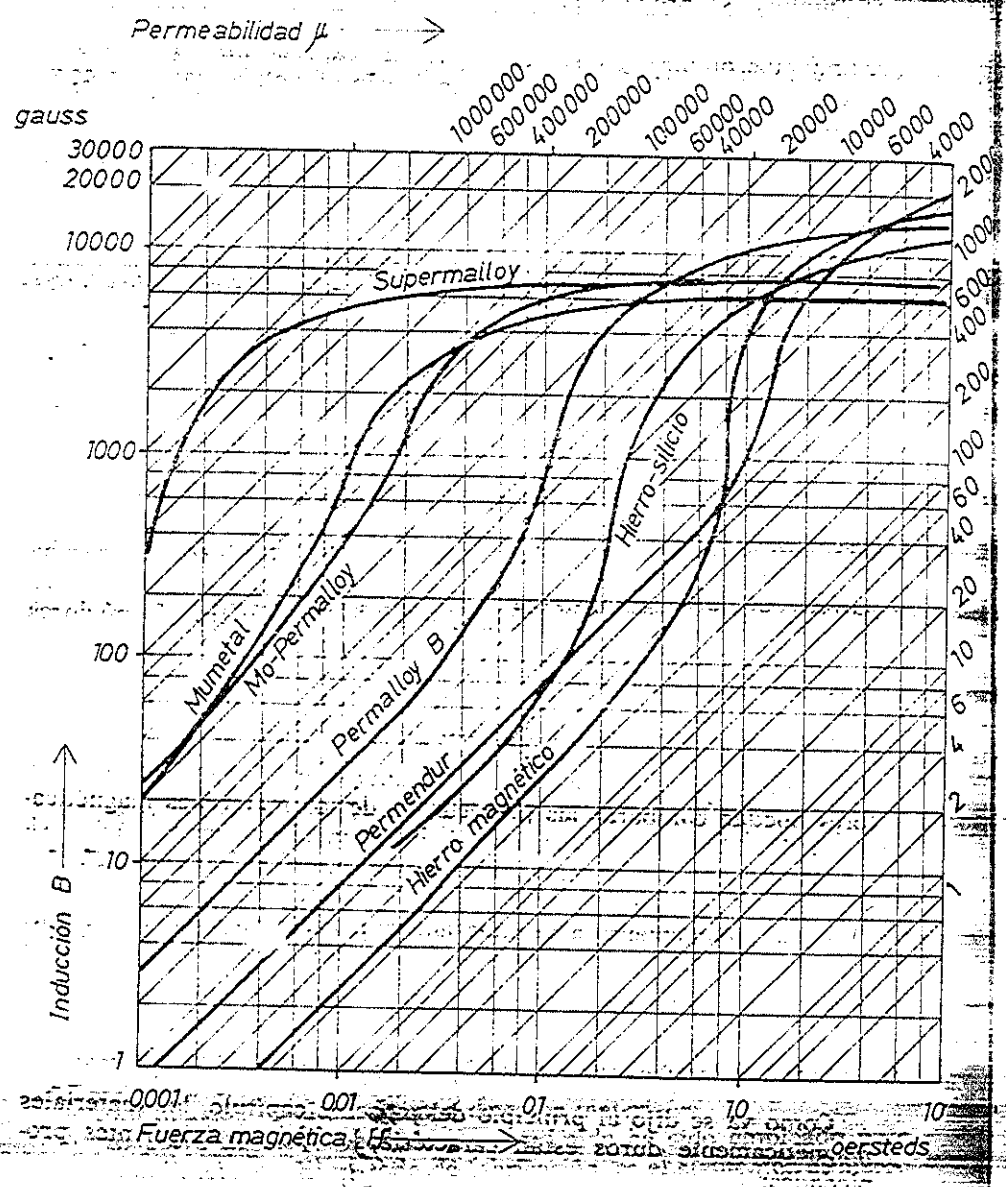


Fig. 134.—Curvas de magnetización de algunos materiales magnéticamente blandos.

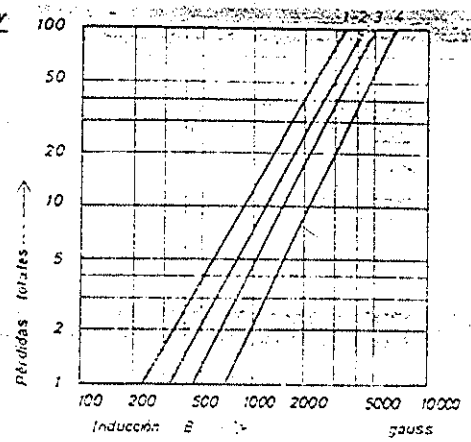


Fig. 135.—Curvas de pérdidas totales de algunos materiales magnéticamente blandos. 1—Hyperm 50. 2—Megaperm 6510. 3—Mumetal. 4—Aleación 1040.

Precisamente, la alta fuerza coercitiva de estos materiales, los hace muy apropiados para la construcción de imanes permanentes que constituye, por otra parte, su principal campo de aplicación por lo que, en lo sucesivo, los llamaremos *materiales para imanes permanentes*, denominación que nos parece más intuitiva que la anterior.

Propiedades que deben reunir los materiales para imanes permanentes

Los imanes permanentes son de gran utilidad, ya que constituyen el medio de conservar un campo magnético en el espacio, sin necesidad de ninguna fuente externa de energía. Como no existe calentamiento y como, con las modernas aleaciones, se pueden producir campos magnéticos muy elevados, los imanes permanentes son muy empleados en la construcción de altavoces, de pequeñas dinamos (magnetos) y alternadores, etc.

La determinación fundamental de las propiedades magnéticas de un material para imanes permanentes, está fijada por la curva de desmagnetización, definida en el capítulo anterior. Un buen material para imán permanente debe reunir, en lo posible, dos características esenciales:

1. Que almacene o acumule en su interior el máximo de magnetismo posible lo que, técnicamente, se expresa diciendo que debe tener una *remanencia elevada*, determinada, como sabemos, por el valor de la *inducción residual* B_r, es decir, la inducción magnética que queda en un material cuando se anula la fuerza magnética efectiva.
2. Que este magnetismo, almacenado al imantar el material, no se pierda al ser sometido a la acción de campos desmagnetizantes, para lo cual es necesario que dicho material tenga una *retentividad elevada*, que está determinada por la *fuerza coercitiva* H_c, es decir, la fuerza magnética negativa o desmagnetizante, necesaria para anular la inducción residual B_r.

Para comprender mejor esto que hemos dicho, en la figura 136 se han representado las curvas de desmagnetización de dos materiales típicos utilizados para la construcción de imanes permanentes. La curva 1 corresponde a un material de alta remanencia y moderada retentividad, mientras que la curva 2 corresponde a un material de baja remanencia y elevada retentividad. El material ideal para la construcción de imanes permanentes sería aquél cuya curva de desmagnetización se aproximara a la superficie del rectángulo tramado, ya que entonces tendría alta remanencia y elevada retentividad; como veremos en los sucesivos parágrafos, este material ideal aún no se ha conseguido en el estado actual de la técnica.

En el capítulo anterior se definió la *energía externa* de un material magnético, como el producto de las coordenadas (inducción magnética y fuerza magnética) de la curva de magnetización, es decir, el producto

$$W = B\ H$$

Mirarlo si no me acuerdo.

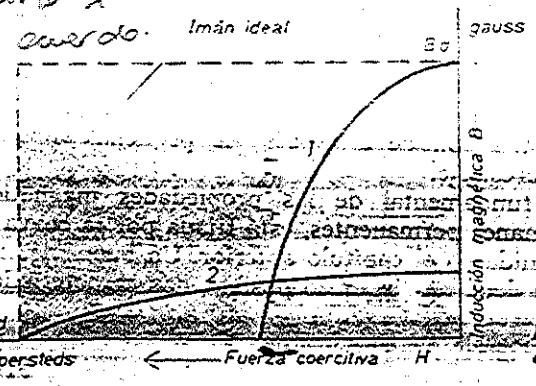


Fig. 136.—Aclaración del concepto de imán ideal

De acuerdo con lo dicho anteriormente (véase figura 136), un material para imanes permanentes será tanto mejor cuanto mayor sea el producto

energía externa

$$W_R = B_r\ H_c$$

Por lo general, y para determinar las características de un material para imanes permanentes, se representan conjuntamente la curva de desmagnetización y la curva de energía externa, es decir, la curva de los productos (B H) en función de la inducción (Fig. 137).

En el momento de separar el imán del circuito magnético que lo ha imantado, las líneas de fuerza que salen de los polos del imán, tienden a cerrarse a través del aire, que tiene mucha mayor reluctancia que el circuito magnético anterior. Como consecuencia, tiende a disminuir el flujo magnético que sale de los polos del imán y, por lo tanto, la inducción remanente B_r tomará un valor menor, ya que el mencionado aumento de reluctancia actúa como un campo desmagnetizante. A cada valor del campo desmagnetizante H_c, corresponderá otro de la inducción B_r; la relación entre los diversos valores de estas dos magnitudes, se expresa por la curva de desimanación o de desmagnetización, que ya hemos definido.

Por consiguiente, sobre las curvas de desmagnetización de los diversos materiales magnéticos, están los puntos que corresponden a las distintas posibilidades de trabajo de un imán permanente. Evidentemente, se tendrán las mejores condiciones de trabajo cuando se cumpla la condición:

$$W = B\ H = máximo$$

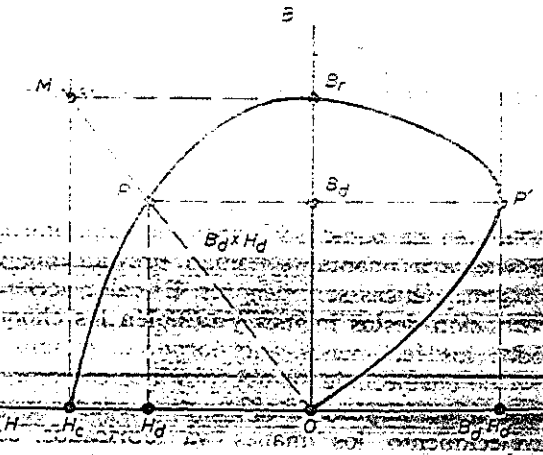


Fig. 137.—Determinación gráfica de las características de funcionamiento de un imán permanente.

A este valor se le llama *índice de energía de un material magnético.*

En la curva de energía externa (véase la figura 137), el valor máximo corresponde, evidentemente, al punto P' de la tangente vertical a dicha curva. Para determinar el valor máximo de los productos (B H) en la curva de desmagnetización (véase nuevamente la figura 137), se traza por E_r una horizontal, y por H_c una vertical; el punto M, de intersección de estas dos líneas, se une con el origen O de coordenadas. El punto P, en que esta última línea corta a la curva de desmagnetización, será el de trabajo más favorable del imán, ya que la superficie delimitada por los valores de B_d y H_d hallados es máxima, o sea que

$$W_{max} = B_d \, H_d$$

Si se conoce la curva de energía externa del material considerado, el punto P puede hallarse también, prolongando una horizontal desde el punto P' hasta que corte a la curva de desmagnetización.

Por lo general, los imanes permanentes no trabajan ni en el punto de máxima inducción remanente B_r, ni en el punto de máxima fuerza coercitiva H_c, sino en un punto situado entre estos dos, sobre la curva de desmagnetización y que debe procurarse que sea aquél en que

$$W_{max} = B_d \, H_d$$

La determinación del punto de la curva de desmagnetización en que trabaja un imán permanente siempre es aproximado, ya que en la determinación de este punto influyen diversos factores: forma del imán, entrehierro, campos magnéticos exteriores, etc. Por lo general se determina gráficamente según la forma del imán y las condiciones de servicio.

Antes de terminar este parágrafo, hemos de decir unas palabras sobre el *envejecimiento* de los imanes permanentes. Es un hecho bien comprobado que los imanes pierden sus propiedades magnéticas con el tiempo; esta pérdida es relativamente grande en las primeras horas, decrece después y se hace insignificante al cabo de unas semanas. También ha podido comprobarse experimentalmente que, cuando se vuelve a imantar un imán previamente desmagnetizado, las pérdidas magnéticas son menores. El calor acelera el proceso de desmagnetización de los imanes y también los choques mecánicos.

Todos los fenómenos anteriormente citados se atribuyen a un proceso de envejecimiento que produce cambios en la estructura interna del material y modifica sus propiedades magnéticas. Para evitar el envejecimiento, los imanes, ya fabricados, se someten a varios calentamientos en agua hirviendo, en períodos de cinco horas; efectos

parecidos se consiguen sometiendo a los imanes a choques sucesivos. Estos tratamientos de *envejecimiento artificial*, estabilizan las propiedades magnéticas de los imanes tratados.

Durante el funcionamiento del imán, para evitar la pérdida de sus propiedades magnéticas, es buena norma cerrar el circuito magnético con una pieza de hierro dulce durante los períodos en que el imán no trabaja.

Materiales empleados en la construcción de imanes permanentes

La gran variedad de materiales que actualmente se emplean en la construcción de imanes permanentes, pueden clasificarse en estos tres grandes grupos:

a) Aceros
b) Aleaciones especiales
c) Materiales cerámicos

Parece demostrado que existe cierta relación entre los factores que provocan el aumento de energía externa de un imán permanente y los tratamientos térmicos a que se someten los materiales correspondientes, sobre todo en lo que hace referencia al temple. Uno de estos factores, posiblemente el más importante de todos, es la presencia de acciones internas, que provocan una modificación en la estructura cristalina del metal. Actualmente, estas acciones internas solamente pueden provocarse en grado suficiente mediante los dos sistemas de temple utilizados en la obtención de materiales para imanes permanentes:

a) Temple por enfriamiento
b) Temple por dispersión

En el *temple por enfriamiento*, la modificación de la estructura cristalina procede de una transformación en el estado sólido de un sistema de cristalización a otro; esta transformación se provoca durante el enfriamiento. Introduciendo ciertos cuerpos en la aleación, puede modificarse la velocidad de esta transformación, de forma que no sea completa, obteniéndose así una solución del cuerpo precipitado en la aleación. De esta forma, se obtienen aceros al tungsteno, al cromo, al cobalto, etc., como materiales para imanes permanentes. La estructura obtenida es inestable y con tendencia al envejecimiento. Además, la influencia de las altas temperaturas sobre estas aleaciones es tan intensa, que no pueden emplearse procedimientos de fabrica-

ción ni de mecanizado en los que sea necesaria una temperatura elevada, como sucede, por ejemplo, con la soldadura.

Con el *temple por dispersión* se evitan gran parte de estos inconvenientes. Consiste este tratamiento en una operación de temple propiamente dicha, seguida de un recalentamiento a temperatura inferior a aquélla en que comienza la cristalización y, finalmente, de un revenido. Este es el procedimiento empleado en las aleaciones especiales para imanes permanentes (aleaciones aluminio-níquel-cobalto, cobre-níquel-hierro, etc.).

A continuación, se estudian con algún detalle los tres grandes grupos de materiales para imanes permanentes, que se han citado anteriormente.

Aceros para imanes permanentes

Los materiales para imanes permanentes clasificados como aceros, se adquieren generalmente al fabricante de acero como productos semiterminados y deben recibir la forma definitiva, ser tratados térmicamente e imanados por el comprador. Las operaciones iniciales consisten en el forjado, estampado, mecanizado, etc., para dar al imán la forma deseada. Los procesos siguientes consisten en recocido, templado, imanación y envejecimiento artificial. Por lo general, los aceros para imanes permanentes son difíciles de forjar y de mecanizar y requieren un cuidadoso tratamiento térmico para que adquieran las propiedades deseadas y evitar grietas y deformaciones. En la tabla siguiente, se indican los tratamientos recomendados para varios aceros para imanes permanentes.

La imanación del acero después de su templado, requiere la aplicación de fuerzas magnéticas relativamente elevadas, de cuatro a seis veces la fuerza coercitiva máxima que debe tener el material terminado.

El envejecimiento artificial produce la estabilización de las propiedades magnéticas del material. Para ello, en el caso de aceros para imanes permanentes, se emplean tratamientos térmicos a bajas temperaturas. Por ejemplo, un acero al cobalto, templado a 950° C y luego envejecido durante cinco horas a 100° C, experimentará una progresiva disminución de la fuerza coercitiva y un aumento de la inducción remanente. Mediante tratamientos análogos, las propiedades magnéticas pueden hacerse estables y permanentes durante períodos muy largos. El procedimiento más adecuado para obtener los mejores resultados depende, en cada caso, de los materiales que constituyen el acero y, en general, deben seguirse cuidadosamente las instrucciones del fabricante.

TABLA 77. TEMPERATURAS DE TRATAMIENTO DE LOS ACEROS PARA IMANES PERMANENTES

Denominación	Composición	Temperatura de formación °C	Temperatura de recocido °C	Temperatura de temple °C	Procedimiento de temple	Procedimiento de envejecimiento artificial
Acero al tungsteno 5 %	5 % W	915	720	890	Agua	En agua a 100 °C
Acero al tungsteno 6 %	6 % W	915	720	850	Aceite	» » » »
Acero al cromo 2,5 %	2,5 % Cr	915	750	830	Agua	» » » »
Acero al cromo 6 %	6 % Cr	915	750	860	Aceite	» » » »
Acero al cromo-cobalto	5 % Cr; 9 % Co	915	915	915	Aceite	En aire a 100 °C
Acero al cromo-cobalto	9 % Cr; 16 % Co	970	915	1 110	Aire	» » » »
Acero al cromo-cobalto	9 % Cr; 16 % Co	970	915	1 025	Aire	» » » »
Acero al cromo-cobalto-tungsteno	5 % Cr; 36 % Co; 4 % W	970	915	960	Aceite	» » » »

A continuación se estudian los aceros para imanes permanentes más utilizados en la práctica.

Aceros al carbono. Los aceros con gran contenido de carbono son materiales magnéticamente duros (véase un parágrafo anterior), y se utilizan para fabricar pequeños imanes. Generalmente, se emplean aceros con 0,6 a 1 % de carbono y 0,2 a 0,8 de manganeso. Estos aceros se forjan a unos 900° C; después, se efectúa un recocido a 700° C, enfriándolos al aire. El temple se efectúa a 800° C, enfriándolos al agua. Posteriormente se imanan y se les da un tratamiento de envejecimiento en agua hirviendo durante varias horas.

Las características magnéticas de los aceros al carbono, son las siguientes:

Fuerza coercitiva H_c	40 oersteds
Inducción remanente B_r	9 500 gauss
Energía externa $B\ H$	$0{,}2 \times 10^6$

Aceros al tungsteno. Contienen aproximadamente de 0,6 a 1 % de carbono, de 4 a 6 % de tungsteno y alrededor de 0,5 % de manganeso; algunas veces se añade hasta un 2 % de cromo. Estos aceros pueden forjarse a unos 1 000° C, recocerse a 750° C, enfriarse al aire y templarse a unos 800° C, con enfriamiento al agua. Debe cuidarse de no mantenerlos mucho tiempo a temperaturas elevadas, porque pierden sus propiedades magnéticas.

Después de imanados convenientemente, estos aceros tienen las siguientes características:

Fuerza coercitiva H_c	70 oersteds
Inducción remanente B_r	10 500 gauss
Energía externa $B\ H$	$0{,}3 \times 10^6$

Como puede apreciarse, sus características magnéticas son superiores a las de los aceros al carbono. Además tienen sobre éstos la ventaja de que conservan durante más tiempo sus propiedades magnéticas, incluso bajo la acción de calentamientos, choques, etc.

Aceros al cromo. Contienen de 0,6 a 1 % de carbono, de 1 a 5 % de cromo y alrededor de 0,5 % de manganeso. Estos aceros se forjan a 900° C, para someterse después a un tratamiento de recocido a 700° C y de temple a 800° C, con enfriamiento al agua.

Después de imanados, tienen las siguientes características:

Fuerza coercitiva H_c	60 oersteds
Inducción remanente B_r	9 500 gauss
Energía externa $B\ H$	$0{,}3 \times 10^6$

Como puede apreciarse, estos aceros tienen características magnéticas casi iguales que los aceros al tungsteno, con la ventaja de que resultan más baratos.

Aceros al cromo-cobalto. Son aleaciones con aproximadamente de 10 a 16 % de cobalto y 9 % de cromo. Tienen la ventaja de que pueden mecanizarse fácilmente por lo que resultan apropiados para la producción en gran escala. Estos aceros se forjan a 1 000° C y se someten después a operaciones de recocido a 900° C y templado a 1 100° C, con enfriamiento al aire.

Después de imanados, tienen las siguientes características:

Fuerza coercitiva H_c	200 oersteds
Inducción remanente B_r	7 500
Energía externa $B\ H$	$0{,}6 \times 10^6$

Aunque magnéticamente no son tan eficientes como los aceros al cobalto, que estudiaremos seguidamente, tienen sin embargo la ventaja de que resultan más baratos.

Aceros al cobalto. Se conocen también como *Aceros K. S.* Contienen, aproximadamente, 36 % de cobalto, 4 % de tungsteno y 6 % de cromo. Se trabajan y pulimentan bien en caliente y sus características magnéticas son superiores a los demás aceros para imanes; pero a causa de su alto contenido de cobalto resultan caros. Estos aceros se forjan a 950° C. El recocido se realiza a 780° C, con enfriamiento en el horno y se templan a 975° C, con enfriamiento al aire o al aceite, según el contenido de cobalto. Después se mganetizan y se les da un tratamiento de envejecimiento en agua hirviendo.

Sus características magnéticas dependen del contenido de cobalto. En los Aceros K. S. son las siguientes:

Fuerza coercitiva H_c	240 oersteds
Inducción remanente B_r	9 600 gauss
Energía externa $B\ H$	$0{,}95 \times 10^6$

Otra ventaja de los aceros al cobalto es que conservan mejor el magnetismo remanente en presencia de campos magnéticos alternos, que los restantes aceros para imanes permanentes.

Como resumen del presente parágrafo, véase en la figura 138, las curvas de desmagnetización y de energía externa de algunos aceros para imanes permanentes.

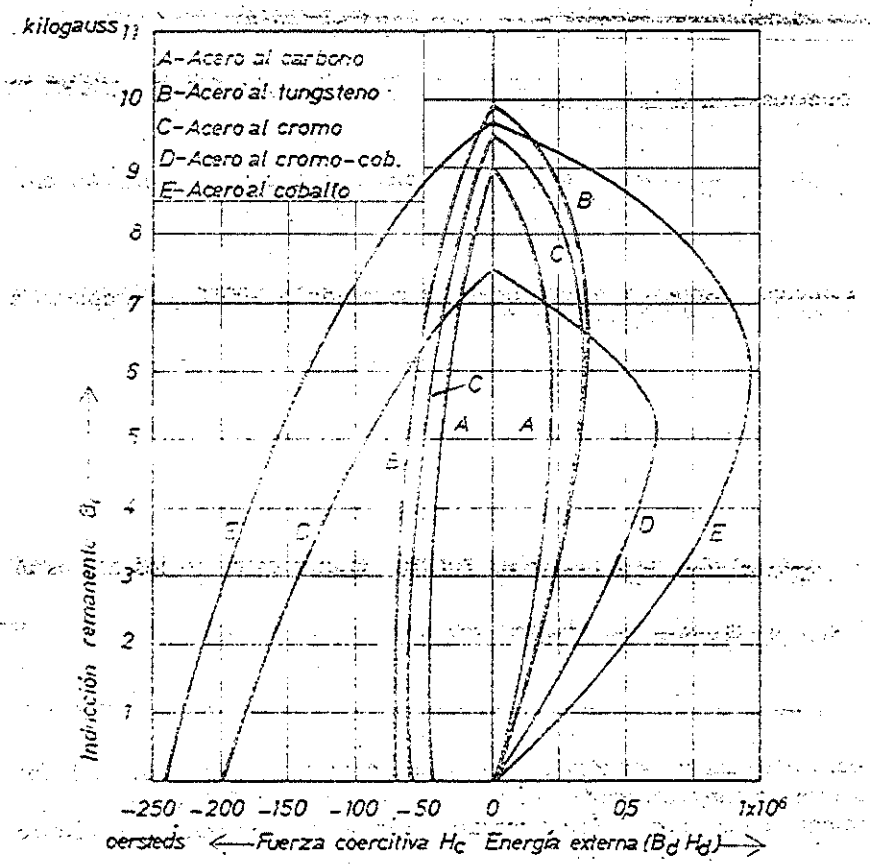


Fig. 138.—Curvas de desmagnetización y de energía externa de los aceros para imanes permanentes.

Aleaciones especiales para imanes permanentes

Desde hace algunos años, se están desarrollando un conjunto de aleaciones especiales binarias o de más elementos, cuyas características magnéticas son muy superiores a las de los aceros para imanes. Estas aleaciones están constituidas por hierro, aluminio, níquel, cobalto, molibdeno, vanadio, cobre, manganeso e, incluso, titanio y plata, en cantidades variables. A continuación, se estudian las características de las más interesantes de estas aleaciones.

Aleaciones aluminio-níquel-hierro. Estas aleaciones para imanes permanentes contienen mayor energía por unidad de costo o de volumen, que cualquier otro material para imanes permanentes que pueda encontrarse en el mercado. Se caracterizan por tener más fuerza coercitiva y energía y, con excepción a alguna de ellas, menor inducción remanente que los imanes de acero. Se fabrican solamente por fundición o en polvo comprimido y, mecánicamente, son relativamente débiles y quebradizas. No pueden mecanizarse más que por rectificado y para su imanación se requiere una fuerza magnética de 2 000 a 3 000 oersteds.

Las más conocidas de estas aleaciones son las denominadas *Alnico*, que, además de aluminio, níquel y cobalto, contienen también algunas veces, cobre y titanio. Hasta la fecha se han fabricado doce tipos de Alnico, numeradas del 1 al 12. Las más interesantes desde el punto de vista magnético, son las numeradas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 12. Los materiales de mayor magnetismo remanente son los Alnico 5 y 5, en los que $B_r = 12\,000$ gauss. El de mayor fuerza coercitiva es el Alnico 12, con $H_c = 950$ oersteds. El Alnico 5 es el que contiene mayor energía externa del grupo, ya que se tiene

$$B_d\, H_d = 5 \times 10^6$$

Estas sobresalientes propiedades se obtienen, en el caso del Alnico 5, por enfriamiento en un campo magnético. De esta forma adquiere propiedades direccionales y debe entonces utilizarse en la dirección del campo magnético aplicado durante el tratamiento térmico anterior. Pueden obtenerse imanes de pequeño tamaño y de excelente calidad, prensando el material pulverizado, con lo que se reduce el trabajo de acabado y se logra una resistencia mecánica mucho mayor que con el material fundido.

En la figura 139 se han representado las curvas de desmagnetización y de energía externa de algunos tipos de Alnico.

En España se fabrican aleaciones de aluminio-níquel-cobalto, con los nombres de *Safe-Nialco* y *Safe-Supernialco*, esta última con propiedades direccionales.

Por adición de pequeñas cantidades de otros metales, además de los citados (aluminio-níquel-cobalto) se obtienen aleaciones de los grupos *Alcomax* y *Ticonal*. Por ejemplo, el *Alcomax II* contiene 8 % de aluminio, 11,5 % de níquel, 21 % de cobalto, 4 % de cobre y 57,5 % de hierro; este grupo de aleaciones se fabrica en Inglaterra. En Holanda se ha desarrollado la serie *Ticonal*; como ejemplo, el *Ticonal F* contiene 8 % de aluminio, 14 % de níquel, 24 % de cobalto, 3 % de cobre, 0,5 % de titanio y 50,5 % de hierro. Por lo general, estas aleaciones tienen mayor inducción remanente que las de la serie

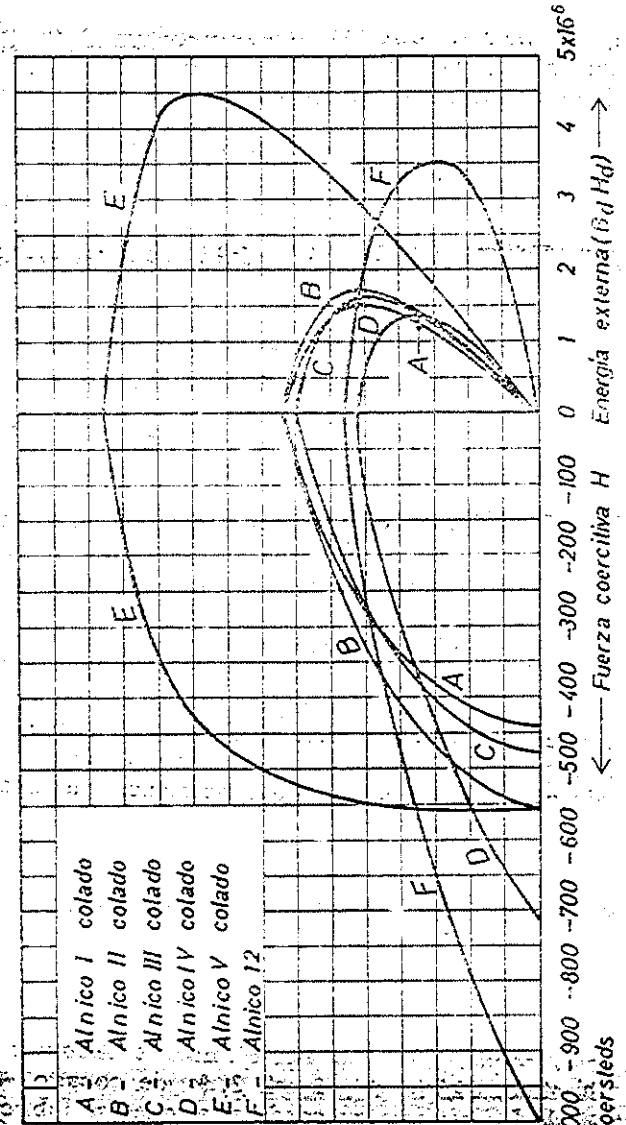


Fig. 139. Curvas de desmagnetización y de energía externa de las aleaciones Alnico para imanes permanentes.

Alnico, con fuerzas coercitivas semejantes, lo que quiere decir que tienen mayor energía exterior.

Aleaciones cobre-níquel-hierro. En los últimos años han aparecido estas aleaciones que, además de sus propiedades magnéticas, se caracterizan por su ductilidad, por lo que pueden trabajarse mecánicamente y laminarse en espesores muy finos; debido a estas propiedades, sus aplicaciones más importantes son las de los hilos y cintas magnetofónicas. Las primeras aleaciones de este tipo están basadas en el material de origen alemán denominado *Cunife*, que contiene 20 % de hierro, 20 % de níquel y 60 % de cobre; esta aleación tiene una inducción remanente de 5 280 gauss y una fuerza coercitiva de 460 oersteds. Se han propuesto otras aleaciones de este tipo; por ejemplo, una con 70 % de hierro, 15 % de níquel y 15 % de cobre, con una inducción residual de 1 500 gauss y una fuerza coercitiva de 300 oersteds. Las propiedades de todas estas aleaciones varían si se trabajan en frío, y presentan características fuertemente direccionales. En la figura 140 se representan gráficamente las características del *Cunife*, junto con las de otras aleaciones especiales de las que vamos a tratar seguidamente.

Aleaciones cobre-níquel-cobalto. Con composiciones que varían entre 25 a 50 % de cobalto, 20 a 26 % de níquel y 25 a 60 % de cobre, se obtienen aleaciones de interesantes características magnéticas y que, como las anteriores, se pueden mecanizar fácilmente, por lo que tienen un campo de aplicación semejante. Constituyen el grupo *Cunico*; por ejemplo, el *Cunico II*, constituido por 35 % de cobre, 24 % de níquel y 41 % de cobalto, tiene las siguientes características:

Fuerza coercitiva H_c	450 oersteds
Inducción remanente B_r	5 300 gauss
Energía externa $B\ H$	$0{,}99 \times 10^6$

En la figura 140 se representan gráficamente las características magnéticas del Cunife.

Aleaciones hierro-cobalto-vanadio. Las más interesantes de estas aleaciones son las del grupo *Vicalloy*; la constitución del material base es: 34 % de hierro, 52 % de cobalto y 14 % de vanadio, con las siguientes características:

Fuerza coercitiva H_c	400 oersteds
Inducción remanente B_r	9 600 gauss
Energía externa $B\ H$	$2{,}5 \times 10^6$

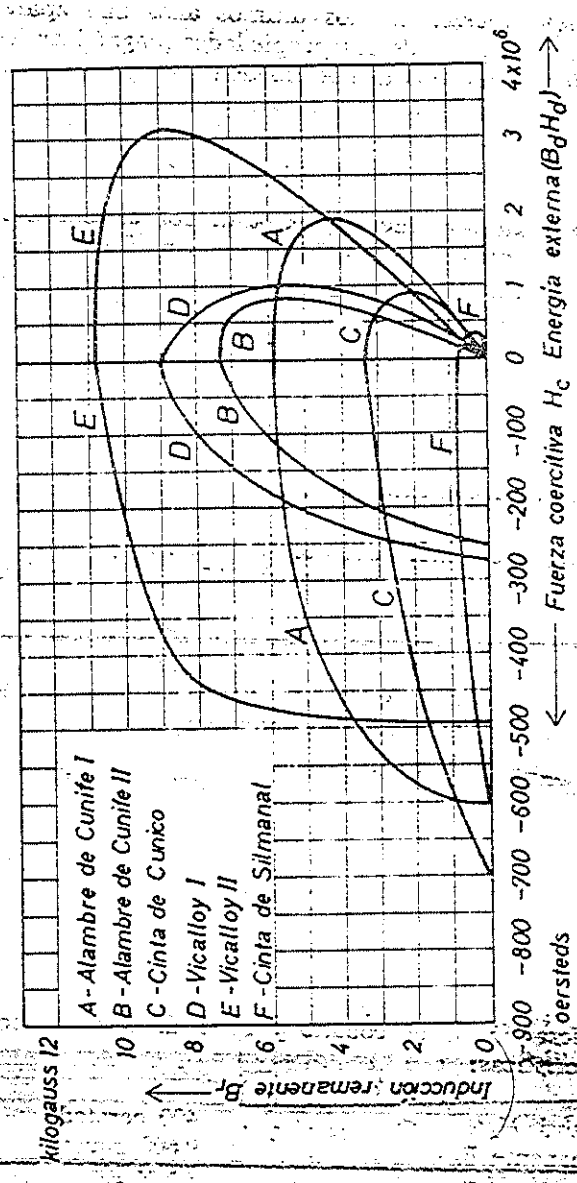


Fig. 140. — Curvas de desmagnetización y de energía externa de algunas aleaciones especiales para imanes permanentes.

Estas aleaciones son dúctiles y maleables y algunas de ellas tienen características muy direccionales (como el *Vicalloy II*), correspondiendo las mejores propiedades a la dirección en que se ha efectuado el trabajo en frío.

En la figura 140, ya citada anteriormente, se expresan gráficamente las características magnéticas de los *Vicalloy I y II*.

Aleaciones con metales preciosos. Con ciertas aleaciones platino-hierro, platino-cobalto y aluminio-manganeso-plata, se han obtenido valores extraordinarios de la fuerza coercitiva. La más conocida de estas aleaciones es el *Silmanal*, constituido por 86 % de plata, 9 % de manganeso y 5 % de aluminio, y cuyas características son las siguientes:

Fuerza coercitiva H_c	6 700 oersteds
Inducción remanente B_r	595 gauss
Energía externa $B\ H$	$1{,}48 \times 10^6$

Lo mismo que las anteriores, en la figura 774 se representan gráficamente las características magnéticas del *Silmanal*.

Materiales cerámicos para imanes permanentes

Los imanes permanentes *cerámicos*, se denominan de esta manera por la semejanza del material que los constituye con los productos cerámicos. Fundamentalmente, están constituidos por compuestos químicos constituidos por hierro y bario y cuya fórmula general es

$$Ba\ Fe_{12}\ O_{19}\ (6\ Fe_2\ O_3 \cdot Ba\ O)$$

Estos compuestos reciben el nombre general de *ferritas* y se designan con nombres comerciales tales como *Ferroxdure, Ferribarita*, etcétera. Son de color negro y muy duros y frágiles. Se fabrican por sinterización del compuesto anteriormente citado, en forma de polvo muy fino, de granos cuyas dimensiones son menores de 1 micra, para que cada grano constituya un dipolo.

La fuerza coercitiva de estos materiales es muy elevada, del orden de 2 000 oersteds aunque su energía externa no es superior a 3×10^6: pero esta energía resulta muy elevada con relación a su peso, ya que tienen una densidad que es un 35 % de la de los materiales del grupo Alnico. Son también muy resistentes a la desmagnetización, aun en presencia de campos magnéticos variables y sometidos a vibraciones y choques.

Además, estos materiales tienen también dos buenas cualidades:

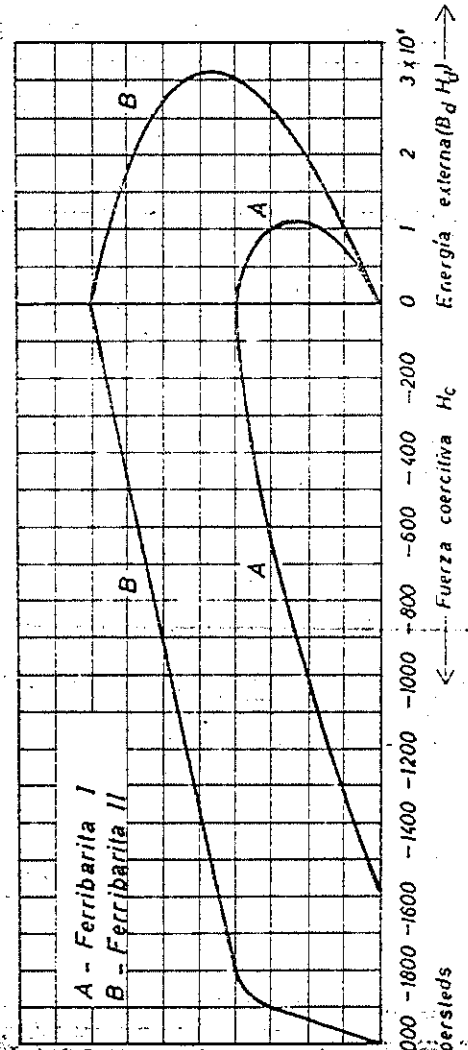


Fig. 141. — Curvas de desmagnetización y de energía externa de los materiales cerámicos para imanes permanentes.

en primer lugar, son aislantes eléctricos, lo que resulta muy interesante para las aplicaciones de alta frecuencia, ya que su elevada resistividad hace que las pérdidas por corrientes de Foucault sean mínimas. En segundo lugar, son de fabricación muy económica, por lo que resultan apropiados para la fabricación en grandes series, debido a la baratura de las materias primas que los constituyen.

Cada día se extiende más el campo de aplicación de los imanes cerámicos: dinamos de bicicletas, estatores de micromotores de corriente continua, rotores de micromotores de corriente alterna, acoplamientos magnéticos, altavoces, etc.

Para que el lector pueda tener una idea de la importancia creciente de las ferritas en la industria electrotécnica, podemos decir que actualmente en Alemania se utilizan los imanes de aleaciones especiales (Alnico y semejantes) en un 45 %, los imanes cerámicos en un 50 % y los imanes a base de aceros en un 5 %.

Una aplicación muy interesante de las ferritas es la de *imanes plásticos* o *imanes flexibles*, que están constituidos por polvos de ferrita aglomerados con resinas plásticas o con caucho sintético. De esta forma se obtiene un material flexible, que puede moldearse fácilmente en forma de cintas, barras, etc. Aunque las características magnéticas de estos imanes no son muy elevadas y dependen, naturalmente, de la proporción de polvos magnéticos aglomerados, resultan suficientes para muchas aplicaciones prácticas: cierres de las puertas de frigoríficos, juntas magnéticas, juguetes, efectos publicitarios, etc.

En la figura 141 se expresan gráficamente las propiedades magnéticas de los materiales cerámicos denominados comercialmente como *Ferribaritas I* y *II*.

Resumen de los materiales magnéticamente duros

Resumiendo el estudio realizado de los materiales magnéticamente duros y para que los lectores puedan comparar las propiedades de estos materiales, en la tabla 78 se exponen características magnéticas más interesantes.

Materiales no magnéticos

Ciertas aleaciones comerciales son paramagnéticas o tienen permeabilidades bastante bajas para ser útiles como materiales de construcción donde las pérdidas pueden tener importancia. En la tabla 79 se exponen algunos de estos materiales.

TABLA 78. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS PARA IMANES PERMANENTES

Denominación comercial	Composición	Inducción remanente Br gauss	Fuerza coercitiva Hc oersteds	Energía externa Bd Hc gauss × oersteds
Acero al carbono 1 %	1 % C; 0,5 % Mn	9 000	51	0,20 × 10^6
Acero al tungsteno 5 %	5 % W; 0,7 % C	10 500	70	0,33 × 10^6
Acero al cromo 4 %	4 % Cr; 1 % C; 0,4 Mn	9 800	60	0,28 × 10^6
Acero al cromo 6 %	6 % Cr; 1 % C; 0,4 Mn	9 800	70	0,29 × 10^6
Acero al cromo-cobalto	2 % Cr; 4 % Co	9 800	80	0,32 × 10^6
Acero al cromo-cobalto	9 % Cr; 16 % Co	7 500	200	0,60 × 10^6
Acero al cromo-cobalto-tungsteno	5 % Cr; 36 % Co; 4 % W	9 600	240	0,95 × 10^6
Acero al cobalto 3 %	3 % Co	7 200	130	0,35 × 10^6
Acero al cobalto 6 %	6 % Co	7 500	140	0,44 × 10^6
Acero al cobalto 9 %	9 % Co	7 800	150	0,50 × 10^6
Acero al cobalto 15 %	15 % Co	8 200	180	0,62 × 10^6
Acero al cobalto 35 %	35 % Co	9 000	250	0,95 × 10^6
Alni (normal)	13 % Al; 25 % Ni; 4 % Cu; 58 % Fe	5 600	580	1,25 × 10^6
Alni (gran coercit.)	13 % Al; 27 % Ni; 4 % Cu; 56 % Fe	5 000	680	1,25 × 10^6
Alni (gran remanencia)	13 % Al; 24 % Ni; 4 % Cu; 59 % Fe	6 200	480	1,25 × 10^6
Alnico 1	12 % Al; 22,5 % Ni; 5 % Co; 60,5 % Fe	6 600	540	1,40 × 10^6
Alnico 2	10 % Al; 18 % Ni; 13 % Co; 6 % Cu; 53 % Fe	7 000	650	1,70 × 10^6
Alnico 3	12 % Al; 26 % Ni; 3 % Cu; 59 % Fe	6 400	560	1,35 × 10^6
Alnico 4	12 % Al; 28 % Ni; 5 % Co; 55 % Fe	5 500	730	1,35 × 10^6
Alnico 5	8 % Al; 15 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu; 50 % Fe	12 000	720	5,00 × 10^6
Alnico 6	8 % Al; 17 % Ni; 23 % Co; 3 % Cu; 4 % Ti; 45 % Fe	7 500	975	2,75 × 10^6
Alnico 7	8,5 % Al; 18 % Ni; 24 % Co; 3,25 % Cu; 5 % Ti; 41,25 % Fe	7 500	1 100	3,00 × 10^6
Alnico 8	7 % Al; 15 % Ni; 35 % Co; 4 % Cu; 5 % Ti; 34 % Fe	8 700	1 450	5,20 × 10^6
Alnico 12	6 % Al; 18 % Ni; 35 % Co; 8 % Ti; 41 % Fe	5 700	900	1,80 × 10^6
Alcomax 2	8 % Al; 11,5 % Ni; 21 % Co; 4 % Cu; 57,5 % Fe	13 700	600	5,90 × 10^6

TABLA 78. (CONTINUACIÓN)

Denominación comercial	Composición	Inducción remanente Br gauss	Fuerza coercitiva Hc oersteds	Energía externa Bd Hc gauss × oersteds
Alcomax 3	8 % Al; 13,5 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu; 0,5 % Nb; 51 % Fe	13 200	700	6,10 × 10^6
Alcomax 4	8 % Al; 13,5 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu; 2 % Nb; 49,5 % Fe	12 200	780	5,20 × 10^6
Ticonal F	8 % Al; 14 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu; 0,5 % Ti; 50,5 % Fe	12 400	600	4,80 × 10^6
Ticonal G	8 % Al; 15 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu; 51 % Fe	13 000	600	5,10 × 10^6
Ticonal GX	8 % Al; 13,5 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu; 51,5 % Fe	13 400	780	7,50 × 10^6
Hicomax	7 % Al; 14,5 % Ni; 19,5 % Co; 1,5 % Cu; 57,5 % Fe	13 500	550	5,00 × 10^6
Columax	8 % Al; 13,5 % Ni; 24 % Co; 3 % Cu; 0,5 % Nb; 51 % Fe	13 500	840	8,60 × 10^6
Supernialco	8 % Al; 14 % Ni; 24 % Co; 54 % Fe	12 000	650	5,00 × 10^6
Cunife 1	60 % Cu; 20 % Ni; 20 % Fe	5 700	590	1,85 × 10^6
Cunife 2	50 % Cu; 20 % Ni; 2,5 % Co; 27,5 % Fe	7 300	260	0,78 × 10^6
Cunico 1	50 % Cu; 21 % Ni; 29 % Co	3 400	710	0,85 × 10^6
Cunico 2	35 % Cu; 24 % Ni; 41 % Co	5 300	450	0,99 × 10^6
Vicalloy 1	52 % Co; 9,5 % V; 38,5 % Fe	9 000	300	1,00 × 10^6
Vicalloy 2	52 % Co; 13 % V; 35 % Fe	10 000	450	3,00 × 10^6
Remalloy	12 % Co; 17 % Mo; 71 % Fe	10 000	230	1,00 × 10^6
Silmanal	86,8 % Ag; 8,8 % Mn; 4,4 % Al	595	6 700	1,48 × 10^6
Aleación platino-hierro	77,8 % Pt; 22,2 % Fe	6 830	1 570	3,07 × 10^6
Aleación platino-cobalto	76,7 % Pt; 23,3 % Co	6 400	4 800	9,20 × 10^6
Ferroxdure 100	Fórmula general: 6 Fe_2O_3 · BaO	2 100	1 650	0,90 × 10^6
Ferroxdure 250 K	» » » »	3 550	2 300	3,00 × 10^6
Ferroxdure 300 R	» » » »	3 850	1 900	3,20 × 10^6
Ferroxdure 330 K	» » » »	3 700	3 000	3,30 × 10^6
Ferroxdure 360 R	» » » »	3 900	2 200	3,60 × 10^6
Ferribarita I	» » » »	2 250	1 000	1,00 × 10^6
Ferribarita II	» » » »	3 700	2 000	2,77 × 10^6

TABLA 79. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS MATERIALES METÁLICOS NO MAGNÉTICOS

Denominación	Composición	Permeabilidad magnética μ	Resistividad eléctrica $\frac{\text{ohmios} \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Metal Allegheny 88	7,5 % Ni + 11 % Mn + 0,3 C + Fe	1,02	0,75
Metal Allegheny	8 % Ni + 18 % Cr + Fe	1,01	0,72
Metal Jesson amagnético	10 % Ni + 8 % Mn + 1 % C + Fe	1,20	0,74
Acero al manganeso	12-14 % Mn + 0,5-1,2 % C + 1 % Si + Fe	1,30	0,71
Nomag (hierro colado)	8,5 % Ni + 4,2 % Mn + 2,7 % C + 2,5 % Si + Fe	1,05	1,41
Ni-resist	14 % Ni + 1,25 % Mn + 2,8 % C + 2,5 % Si + 6 % Cu + Fe	—	—
K-monel	66 % Ni + 20 % Cu + 2,75 % Al + Fe	1,03	0,70
Everdur	1 % Mn + 96 % Cu + 3 % Si	1,02	0,26
Acero fundido amagnético	6 % Ni + 11 % Mn + 0,25 % C + 0,5 % Si + Fe	1,15	0,73
Cuhalloy	Cu + Cd + Ag	1,02	0,02