

Materiales Dieléctricos Y Aislantes Primera Parte Ingeniero Adolfo Cano Hencker

Introducción

Los materiales cerámicos más utilizados en la fabricación de aisladores eléctricos son la porcelana y el vidrio.

Otros materiales cerámicos, con aplicaciones específicas, clasificados como cerámica para electrotecnia incluyen:

- Porcelana silícea, utilizada para aisladores de baja y alta tensión.
- Esteatita, para uso en aplicaciones a alta frecuencia.
- Mullita, utilizada para aisladores refractarios y termocuplas.
- Titanato de Bario y de magnesio, para condensadores con alta permitividad.
- Cerámica de alta Alúmina, para aisladores de bajas pérdidas, substratos y partes metalizadas; y para aisladores de alta tensión y alta resistencia mecánica.
- Nitruro de Silicio, utilizado en aisladores resistentes al choque térmico.
- Nitruro de Aluminio, utilizado en substratos aislantes.
- Vidrio de Borosilicato, para aisladores de alta tensión.

La función primaria del aislamiento en circuitos eléctricos es la separación física de los conductores entre sí y de estos con respecto a la línea de tierra, y la regulación o prevención del flujo de corriente entre ellos. Otras funciones son proveer el soporte mecánico, disipación de calor y protección ambiental a los conductores.

La principal ventaja de los aisladores cerámicos consiste en su capacidad para operar a altas temperaturas sin degradarse en sus propiedades químicas, mecánicas, o dieléctricas.

Estos aisladores pertenecen a la clase de materiales conocidos como **Dieléctricos lineales**. En estos materiales, el desplazamiento eléctrico (D) aumenta en proporción directa al campo eléctrico en el dieléctrico (E), siendo la constante dieléctrica relativa (K') la constante de proporcionalidad. Esta relación se da como:

$$D = \epsilon_0 E_a = \epsilon_0 K' E \quad (1)$$

Donde:

E_a es el campo aplicado

ϵ_0 es la permitividad (constante dieléctrica del vacío = 8.85×10^{-12} F/m)

El desplazamiento eléctrico describe la extensión a la cual el campo eléctrico ha sido alterado por la presencia del dieléctrico.

La constante dieléctrica, por definición, es una medida de la habilidad del material para almacenar carga relativa al vacío y es una propiedad característica del material.

Adicionalmente a la constante dieléctrica (K'), otras tres propiedades son importantes para determinar las características aislantes de un material. Estas son: Resistividad eléctrica (volumétrica), ρ , el factor de disipación ($\text{tg } \delta$) y la resistencia dieléctrica (RD). La resistividad eléctrica es simplemente una medida de la resistencia que un cubo unitario del material ofrece al flujo de corriente en un campo eléctrico dado con corriente directa, CD. En un campo eléctrico con corriente alterna, CA, la resistividad eléctrica y la constante dieléctrica están relacionadas por el factor de disipación, el cual mide la pérdida de energía por ciclo del material, la cual ocurre generalmente en forma de calor.

Esta relación está dada por:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \omega \epsilon_0 K' \text{tg } \delta \quad (2)$$

Donde:

σ = Conductividad en (Ohmios.metro)⁻¹

$\omega = 2\pi f$ (f = Frecuencia)

$K' \text{tg } \delta = K''$ = Factor de pérdida

La ecuación (2) muestra la dependencia de la frecuencia de la resistividad (ρ) para una pérdida de resistencia en paralelo con la capacitancia.

La resistencia dieléctrica es una medida del máximo gradiente de voltaje que se puede aplicar a través del dieléctrico sin degradación física de sus propiedades aislantes.

Como una práctica general, los materiales cerámicos que satisfagan los siguientes criterios de propiedades a 25° C, podrían clasificarse como buenos aisladores:

Constante dieléctrica, K'	< 30
Resistividad eléctrica, ρ	10^{12} Ohm . metro
Factor de disipación, $\text{tg } \delta$	< 0.001
Resistencia dieléctrica, RD	> 5 kV/mm
Factor de pérdidas dieléctricas, K''	< 0.03

La tabla No. 1 tomada de "Propiedades de aisladores cerámicos" por Relva C. Buchanam (1) muestra los valores dieléctricos típicos para algunos de los aisladores cerámicos más utilizados. Estas propiedades dieléctricas son importantes para conocer las condiciones de utilización de los aisladores.

2. Composiciones

Muchos de los aisladores cerámicos que aparecen en la tabla No.1 pueden ser agrupados convenientemente como vidrios, cerámica vítrea, porcelanas y fase simple densa o materiales basados en mezclas de óxidos. Esta distinción refleja la cantidad de fase vítrea en la cerámica, la cual tiende a controlar las propiedades dieléctricas.

2.1. Vidrio

Muchas de las aplicaciones de los vidrios como aislantes hacen uso de sus propiedades dieléctricas, pero factores tales como temperatura de ablandamiento y coeficiente de expansión térmica juegan un papel muy importante en la selección de las composiciones para aplicaciones particulares.

El vidrio se caracteriza por tener una estructura amorfa de amplia variabilidad en composición. Los vidrios de óxidos normales pueden clasificarse como silicatos, boratos, fosfatos, o germanatos, dependiendo de los óxidos formadores que conforman su estructura (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , o GeO_2). Esta estructura puede ser modificada con adiciones selectivas de óxidos intermedios tales como Al_2O_3 , Bi_2O_3 , y PbO , los cuales en altas concentraciones pueden contribuir por sí mismos a la formación de vidrio, o con adición de óxidos alcalinos (Li , Na , K , Rb , Cs) o de

óxidos alcalinotérreos (Ca , Mg , Sr , Ba). Los óxidos alcalinos en particular tienen el efecto de debilitar la estructura disminuyendo el punto de ablandamiento y aumentando la movilidad iónica.

Las tablas No. 2 y No.3, tomadas de R.C. Buchanam (1) nos muestran algunas de las propiedades más importantes de los vidrios.

Los vidrios correspondientes a silicatos de sodio y calcio son los más comunes y se utilizan en la fabricación de aisladores de línea y aisladores telefónicos, fusibles, lámparas y algunos substratos. Los vidrios de plomo-potasio son utilizados generalmente como capacitores. Los vidrios de borosilicato se utilizan como substratos, en aisladores de línea y para sellos metal-vidrio con wolframio y molibdeno.

Los vidrios de aluminosilicato son utilizados en componentes electrónicos, en lámparas de mercurio de alta presión (transmisión ultravioleta elevada) y para sellos de cobre, hierro y níquel.

Películas aislantes de vidrio son utilizadas para encapsular el silicio y algunos dispositivos de los circuitos integrados, o para aislamiento de capas en circuitos multi-capas, o como sello en circuitos integrados.

2.2. Porcelana

Según Relva C. Buchanam en su artículo de "propiedades de aisladores cerámicos".- (1) las porcelanas se describen como cuerpos cerámicos policristalinos que contienen típicamente más de 10 % en volumen de una segunda fase vítrea. Esta segunda fase vítrea controla esencialmente densificación, porosidad y distribución de fases dentro de la porcelana, y en gran escala sus propiedades mecánicas y eléctricas.

Las pastas de porcelana pueden clasificarse como porcelana triaxial, esteatita o no feldespática, dependiendo de la composición y la cantidad de fases vítreas presentes dentro de la cerámica.

Según Rex W. Grimshaw en su texto de "Física y química de arcillas y materiales cerámicos".- (2) la porcelana se puede clasificar en seis grupos o divisiones, así: i. Porcelana dura, ii. Porcelana blanda, iii. Porcelana sévres, iv. Porcelana china y japonesa, v. Porcelanas dentales y vi. Porcelanas eléctricas

TABLA 1
Propiedades dieléctricas de aisladores cerámicos

1 MHz, 25° C		(kV/mm)		Propiedades a (Ohm-cm)	
Material	Tan δ	Constante dieléctrica	Factor de Pérdidas	Resistencia Dieléctrica	Resistividad a 25°C
Porcelana (R ₂ O.Al ₂ O ₃ .SiO ₂)	.008-.020	5.0-6.5	.04-.13	6.1-13.0	10 ¹⁴
Zircón (ZrO ₂ .SiO ₂)	.001	8.0-9.6	.008-.0096	6.3-11.5	>10 ¹⁴
Esteatita (MgO.SiO ₂)	.0008-.0035	6.0	.005-.02	7.9-13.8	10 ¹⁷
Forsterita (2MgO.SiO ₂)	.0005-.001	5.8-6.7	.003-.007	7.9-11.9	10 ¹⁷
Cordierita (2MgO.2Al ₂ O ₃ .5SiO ₂)	.003-.005	4.1-5.3	.012-.025	5.5-9.1	10 ¹⁶
Alúmina (Al ₂ O ₃ 90% a 99%)	.0003-.002	8.8-10.1	.003-.02	9.9-15.8	10 ¹⁶
Espinel (MgO.Al ₂ O ₃)	.0004	7.5	.003	11.9	10 ¹⁴
Mullita (3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂)	.005	6.2-6.8	.030-.034	7.8	10 ¹⁴
Magnesia (MgO)	.0001	8.9	.0089	8.5-11.0	>10 ¹⁴
Berilia (BeO 96% a 99%)	.0001-.001	6.0	.006-.06	9.5-13.8	>10 ¹⁶
Zirconia (ZrO ₂)	.01	12.0	.12	5.0	10 ⁹
Toria (ThO ₂)	.0003	13.5	.004	5.3	10 ¹⁰
Hafnia (HfO ₂)	.001	12.0	.12	--	10 ⁸
Ceria (CeO ₂)	.0007	15.0	.0011	--	10 ⁹
Espodumeno (Li ₂ O.Al ₂ O ₃ .SiO ₂)	.005	6.5-7.5	.03-.04	--	10 ¹¹
Nitruro de Boro (BN)	.001	4.2	.004	35.6-55.4	10 ¹⁴
Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄)	.0001	6.1	.0006	15.8-19.8	10 ¹³
Pirocerámica	.0017-.013	5.5-6.3	.01-.07	9.9-11.9	10 ¹²
Mica	.0002	5.4-8.7	.001-.002	39.5-79.1	10 ¹⁶
Vidrio Soda Calcio (Na ₂ O.CaO.SiO ₂)	.0005-.01	4.0-8.0	.002-.008	7.8-13.2	10 ¹²
Cuarzo (SiO ₂)	.0003	3.8-5.4	.0015	15.0-25.0	10 ¹⁴
Silicato de Plomo y Aluminio	.001	8.2-15.0	.008-.015	8.9-16.0	10 ¹³
Nitruro de Aluminio (AlN)	.0001	8.8-8.9	.001	15.0	10 ¹³

TABLA No. 2
Propiedades de algunos vidrios

	Soda-calcio	Boro silicato álcali-zinc	Boro silicato álcali	Alumino-silicato de calcio
Temperatura inicial, °C	472	506	520	670
Temperatura de temple, °C	512	539	565	710
Temperatura de ablandamiento, °C	696	696	720	910
Expansión térmica, ppm/°C	9.2	7.2	3.25	4.6
Densidad, g/cm ³	2.47	2.51	2.23	2.63
Índice de refracción, n _D	1.51	1.53	1.47	1.52
Resistividad volumétrica, Ohm-cm	10 ^{5.6}	10 ^{7.9}	10 ^{13.8}	10 ^{11.2}
Constante dieléctrica (k')	6.5	6.7	4.6	6.4
Módulo de young, psi	10	10.8	9.1	12.4
Durabilidad química en HCl al 5% Mg/cm ² a 100°C, 24 horas	0.02	0.03	0.005	0.4

TABLA No. 3
Propiedades de otros vidrios

	sílica fundida	Boro silicato álcali-plomo	Boro silicato de aluminio
Temperatura inicial, °C	990	--	613
Temperatura de temple, °C	1050	--	650
Temperatura de ablandamiento, °C	1580	725	820
Expansión térmica, ppm/°C	0.56	5.5-6.1	4.5
Densidad, g/cm ³	2.2	--	2.76
Índice de refracción, n _D	1.458	1.58	1.53
Resistividad volumétrica, Ohm-cm	10 ^{11.2}	10 ¹²	10 ^{12.4}
Constante dieléctrica (k')	3.9	8.9	5.8
Módulo de young, psi	10.5	--	9.8
Durabilidad química en HCl al 5% Mg/cm ² a 100°C, 24 horas	0.17	--	0.28

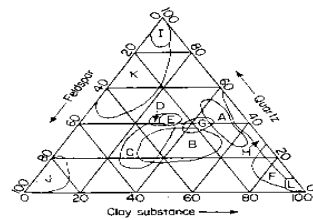


Fig. 12.2 Raw ceramic materials and early triaxial bodies. (A) Semiporcelain; (B) hard porcelain (C) soft porcelain; (D) Chinese porcelain; (E) Japanese porcelain; (F) raw kaolin; (G) stoneware; (H) stoneware clay; (I) sands; (J) feldspars; (K) feldspar sand; (L) washed kaolin. (Wolf.)

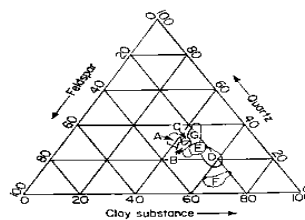


Fig. 12.3 Modern continental bodies. (A) Soft porcelain; (B) figure porcelain; (C) tableware; (D) cookware; (E) hotel ware; (F) chemical porcelain; (G) electrical porcelain. (Kempke and Treufels.)

Figuras 1 y 2: Diagramas triaxiales de porcelana, tomados de Norton

F. H. Norton, en su texto de "Tecnología y aplicaciones de cerámica fina".- (3) expone como existen varias formas para expresar la composición de las pastas de porcelana: i. por materias primas, ii. por minerales, iii. por análisis químico (por óxidos), iv. por fórmula equivalente (fórmula Seger). Ejemplo:

i. Por materias primas

Caolines -----	38.5 %
Arcillas -----	22.2 %
Feldespatos -----	26.2 %
Cuarzos -----	13.1 %

ii. Por minerales, recalculando los minerales contenidos en las materias primas.

Material arcilloso-----	43.0 %
Feldespato -----	30.5 %
Cuarzo -----	26.5 %

iii. Por análisis químico

SiO ₂ -----	66.71 %
Al ₂ O ₃ -----	21.58 %
K ₂ O -----	2.93 %
Na ₂ O -----	1.62 %
CaO -----	0.61 %
MgO -----	0.37 %
Fe ₂ O ₃ -----	0.47 %
Pérdidas por ignición -----	5.54 %

iv. Por fórmula equivalente de óxidos, como fórmula Seger:

RO -----	0.36
R ₂ O ₃ -----	1.0
RO ₂ -----	5.24

Las figuras 1 y 2, correspondientes a las figuras 12.2 y 12.3 del libro de F.H. Norton.- (3), corresponden a diagramas triaxiales de pastas de porcelana y materiales cerámicos.

Richard A. Haber y Peter Smith, en su artículo de "Estudio de cerámica tradicional".-(4) dividen la cerámica fina en dos clases principales: Fórmulas que consisten en minerales arcillosos, feldespato y cuarzo: **porcelanas triaxiales**; y pastas no triaxiales fabricadas con otros

materiales. Mencionan que la cerámica fina puede clasificarse de acuerdo a su grado de porosidad, teniendo en un extremo las pastas porosas que tienen capacidad de absorber grandes cantidades de agua, y en el otro extremo pastas vitrificadas, las cuales son completamente impermeables, con cero absorción de agua. La amplia variedad de pastas entre ambos extremos presenta varios grados de porosidad y translucidez. En la mayoría de los casos esta variación está relacionada con la temperatura a la cual se vitrifica la porcelana.

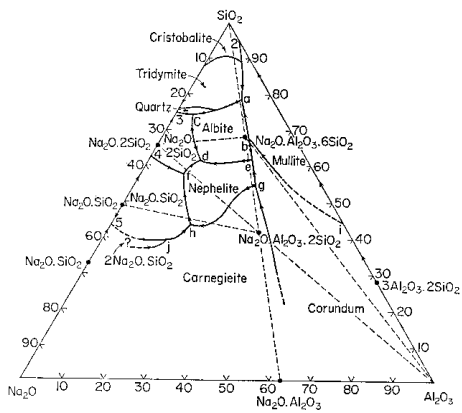
Vitrificación es el tratamiento térmico al cual se somete la pasta de porcelana; durante este proceso algunas de las materias primas funden y forman vidrio: El vidrio genera una reducción progresiva de la porosidad en la pasta, mientras actúa como un enlace con los otros materiales constituyentes de la pasta de porcelana. A medida que aumenta la vitrificación, aumenta la resistencia mecánica de la porcelana.

La figura 5, tomada de "Enciclopedia de Tecnología Química"-Tomo IV- Cerámica.- (11), nos muestra el efecto del tratamiento térmico en las propiedades de una pasta de cerámica blanca.

2.2.1 Porcelanas Triaxiales

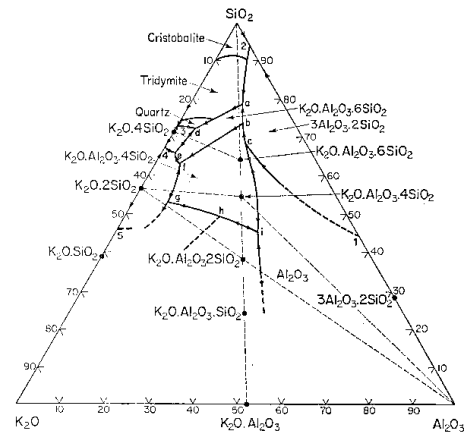
Las porcelanas triaxiales forman una gran base de los aisladores de porcelana. Ellas presentan una buena resistencia mecánica, buena resistencia dieléctrica, baja resistencia al choque térmico y características satisfactorias para trabajo a baja frecuencia (por debajo de 10000 Hertz) a temperaturas ordinarias, pero pobres características para trabajo a alta frecuencia debido a la migración de álcalis.

Las porcelanas triaxiales están compuestas de mezclas de feldespatos [(K,Na)₂O- 3Al₂O₃-6SiO₂], arcillas y caolines [Al₂O₃-2SiO₂-2H₂O] y cuarzo o sílice [SiO₂], lo cual coloca a las porcelanas triaxiales en los diagramas de fase [K,Na)₂O-Al₂O₃-SiO₂] en términos de óxidos. Ver diagrama de fase Na₂O-Al₂O₃-SiO₂, figura 3, y K₂O-Al₂O₃-SiO₂, figura 4, tomados de pag. 649 y 650 del texto " Física y química de arcillas y materiales cerámicos" por Rex W. Grimshaw .-(2)



Binary points		Ternary points	
1	1810 °C P	a	1050 °C E
2	1545 E	b	1104 P
3	789 E	c	740 E
4	837 E	d	732 E
5	1022 E	e	1063 E

E - Eutectic P - Peritectic



Compounds		Points	
Binary	Ternary	Binary	Ternary
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	1	1810 °C P
mullite diss.1810	felspar diss.1100	2	1545 E
K ₂ O·4SiO ₂	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂	3	769 E
m.pt. 770	leucite m.pt.1686	4	742 E
K ₂ O·2SiO ₂	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	5	780 E
m.pt. 1045	kalisphilit 1730	e	695 E
K ₂ O·SiO ₂	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	f	810 P
m.pt. 976		g	905 E
K ₂ O·Al ₂ O ₃		h	1540 P
m.pt. ?		i	1553 E

E - Eutectic P - Peritectic

Figura 3 y 4. Diagramas de fase Soda-Alúmina-Sílice y Potasio-Alúmina-Sílice, tomadas de "Física y química de arcillas y otros materiales cerámicos, por R. W. Grimshaw.-(2)

Las composiciones de material para las porcelanas triaxiales pueden ser dadas como 40% a 60% de arcillas, 20% a 35% de feldespato y 20% a 30% de arena silícea. Cada uno de los materiales contribuye con las diferentes características de la porcelana cocida.

Las porcelanas para baja tensión son cocidas entre 1260 °C y 1320 °C para obtener resistencias dieléctricas entre 9 y 11 kV/mm. En cambio, las porcelanas para alta tensión tienen temperaturas de cocción entre 1350 °C y 1450 °C y presentan resistencias dieléctricas entre 13 y 18 kV/mm.

Entre las porcelanas triaxiales sobresale la **porcelana eléctrica** para fabricación de aisladores de media y alta tensión. Esta es una de las porcelanas más importantes de las pastas triaxiales de cerámica blanca y debe ser un material vitrificado, no poroso per se, sin necesidad de recubrimientos o esmaltes para lograr su impermeabilidad.

Las normas internacionales exigen que la porcelana eléctrica sea preparada por el proceso en húmedo, por lo tanto las arcillas y los caolines, y el feldespato y el cuarzo finamente molidos se mezclan con la cantidad de agua adecuada para conformar una mezcla de consistencia cremosa denominada "barbotina". Dicha barbotina se procesa a través de tamices y separador magnético con el fin de remover partículas gruesas y materiales ferrosos y se bombea a unos filtros-prensa para reducir el contenido de agua del 50% al 20-22% y conformar una masa plástica llamada "galleta"; la masa plástica puede obtenerse

también mezclando barbotina con material seco proveniente de un atomizador. El agua es utilizada como el medio para lograr una completa homogeneidad y permitir la mezcla íntima de los materiales constitutivos. Los posibles aglomerados de partículas se desintegran con ayuda de dispersores de alta velocidad.

Después de la formación de los aisladores por métodos de prensado en caliente, prensado isostático, vaciado, torneado en seco o en húmedo, las piezas se secan y se esmaltan con el fin de obtener un producto final con una superficie tersa que permita la autolimpieza del aislador por acción de las lluvias y el viento; el esmaltado, además de constituir el revestimiento protector de la porcelana, aumenta notablemente su resistencia mecánica (hasta 25% de resistencia a la tracción y a la flexión), aunque no tiene influencia sobre las propiedades dieléctricas.

Las piezas esmaltadas se someten entonces al proceso de cocción en hornos túnel o en hornos discontinuos, en los cuales se dan lugar las reacciones termoquímicas y la formación de fases amorfas y cristalinas que permiten lograr la densificación y vitrificación de la porcelana.

Las características principales de esta porcelana incluyen: porosidad nula, alta resistencia mecánica, excelentes propiedades aislantes, químicamente inerte, elevado punto de fusión y alta estabilidad.

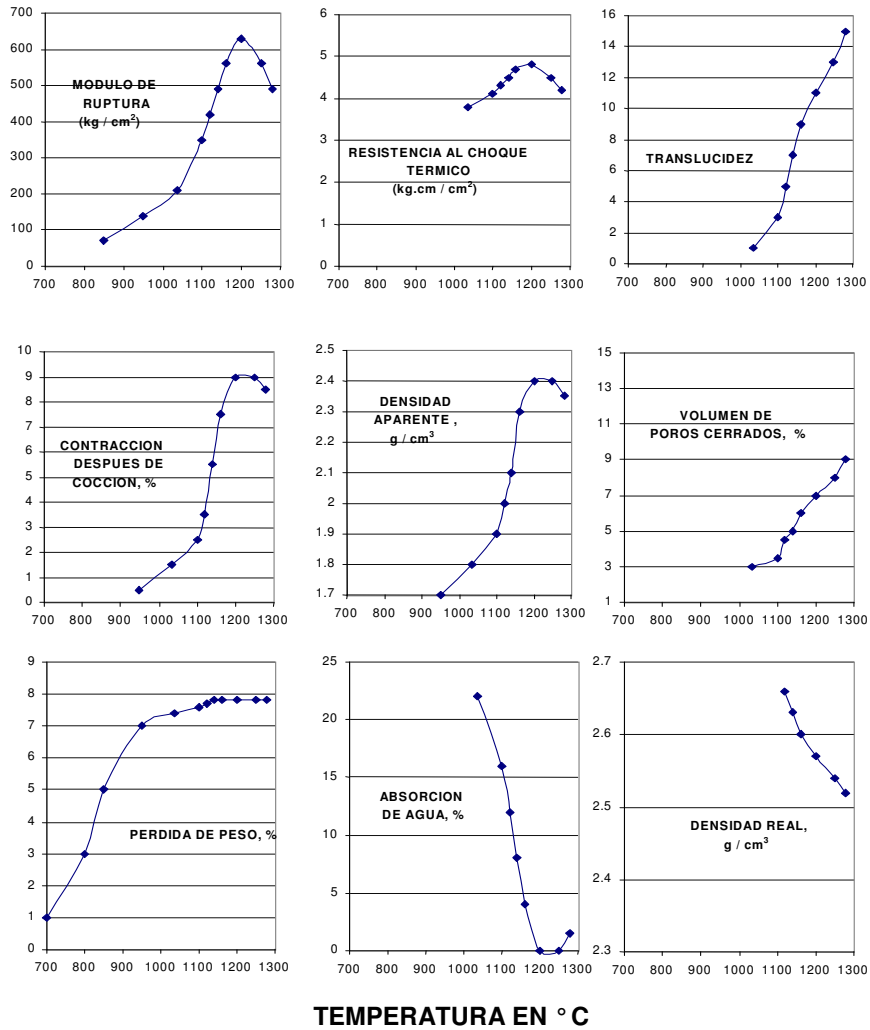


Figura 5. Efecto del tratamiento térmico en las propiedades de una pasta de cerámica blanca. Velocidad de calentamiento de 100 a 1120°C: 40°C/hora; de 1120 a 1220°C/hora: 10°C; de 1220 a 1250°C: 5°C/hora; de 1250 a 1300°C/hora: 10°C/hora. Tomado de “Enciclopedia de Tecnología Química”. Tomo IV.- Cerámica. Tipográfica UTEHA.- (11).

La figura 6: Diagrama triaxial de la porcelana eléctrica, muestra el diagrama de tres componentes desarrollado por Gilchrist G. I. y Klinefelter T.A., en *Elektrokeramik* J.36, el cual fue revisado posteriormente por Weidman T. en el artículo “Contribution to elucidate the role of reinforcement agents in porcelain”, *Sprechsaal* pp2, 29,52 (1959).

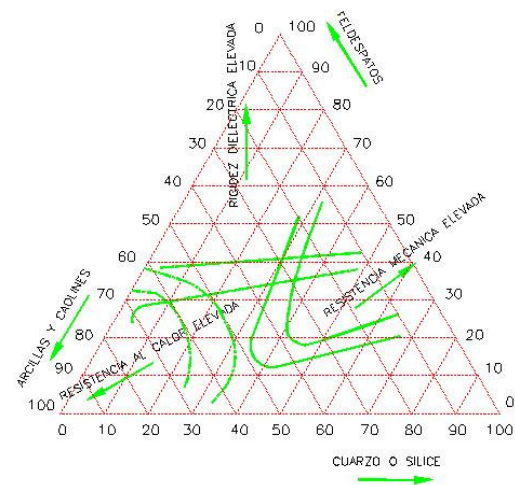


Figura 6. Diagrama triaxial de la porcelana eléctrica

La ciencia de la manufactura de la porcelana eléctrica ha avanzado considerablemente y las pastas utilizadas hoy difieren bastante de las recetas de porcelana convencionales. Los principales avances han sido la

introducción de alúmina, silimanita y cianita a expensas de cuarzo y feldespato.

La porcelana eléctrica de alta resistencia mecánica presenta altos contenidos de alúmina (superiores al 30%); para lograr los altos contenidos de alúmina se puede adicionar bauxita calcinada y finamente molida. Las composiciones de los esmaltes deben ser controladas cuidadosamente para evitar deterioro de las características electromecánicas.

En el Japón se ha desarrollado una **porcelana con alto contenido de cristobalita**, lo cual genera pastas de porcelana con resistencias mecánicas excepcionalmente altas, sin los costos asociados a las adiciones de alúmina. La cristobalita cristaliza de pastas altamente silíceas en forma de partículas extremadamente finas. La manufactura de la porcelana eléctrica moderna hace énfasis en porcelanas de textura fina y cristalina que posean una alta resistencia mecánica y no desarrollen excesivos esfuerzos localizados en su utilización.

2.2.1. Porcelanas no feldespáticas y aisladores de óxidos

Una gran cantidad de aisladores eléctricos se encuentran en el sistema $[MgO-Al_2O_3-SiO_2]$. Estos incluyen todos los grupos de óxidos: MgO , Al_2O_3 y SiO_2 , así:

Compuestos binarios:

$MgO.SiO_2$ ----- Esteatita
 $2MgO.SiO_2$ ----- Forsterita
 $MgO.Al_2O_3$ ----- Espinel

Compuesto ternario:

$MgO.Al_2O_3.2,5SiO_2$ ----- Cordierita

Las cerámicas de **esteatita** son ampliamente utilizadas para aislamiento a alta frecuencia debido a su bajo contenido de álcalis y a sus bajas pérdidas dieléctricas. Son de fácil fabricación debido al alto contenido de talco, pero el control de la microestructura durante el proceso de cocción se dificulta por la tendencia a formar exceso de líquido en el sistema $MgO.SiO_2$. La adición de caolinita en proporciones cercanas al 10% mejora esta característica de proceso y la adición de $BaCO_3$ en proporciones cercanas al 5% mejora las características de fluidez y estabilización de las fases. Las esteatitas presentan muy buenas características mecánicas y excelentes propiedades eléctricas lo cual las hace muy útiles para uso en aislamiento de baja y alta tensión eléctrica.

Las cerámicas de **forsterita** presentan un factor de pérdidas dieléctricas aún más bajo que las de esteatita y pueden utilizarse para aislamiento a alta frecuencia, microondas y a altas temperaturas. Las forsteritas presentan un alto coeficiente de expansión térmica pero son completamente impermeables, y en consecuencia, han sido utilizadas como cubiertas cerámicas de tubos al vacío. Presentan una pobre resistencia al choque térmico.

Las **cerámicas de esteatita y forsterita** son consideradas como materiales aislantes radiocerámicos de clase L, según especificación de American Standard Association, ASA C75.1 y de Join Army Navy, Jan I-10. Dicha especificación exige que el valor promedio del factor de pérdidas sobre seis piezas de prueba, después de sumergirlas en agua destilada durante 48 horas, y de medirlas con frecuencia de un megaciclo, sean inferiores a los siguientes valores:

Grado	Factor de pérdidas
L-1 -----	0.150
L-2 -----	0.070
L-3 -----	0.035
L-4 -----	0.016
L-5 -----	0.008
L-6 -----	0.004

El factor de pérdidas de un material aislante es el producto de la constante dieléctrica y la tangente del ángulo de pérdidas (la tangente del ángulo de pérdidas se considera igual al factor de potencia). La mayoría de los grados comerciales de esteatita pertenecen a los grados L-4 y L-5.

Las **cerámicas de cordierita** poseen coeficientes de expansión térmica extremadamente bajos, una excelente resistencia al choque térmico, particularmente cuando es porosa, y son utilizadas en aplicaciones tales como soporte de resistencias de alambre o carbón. La cordierita se puede obtener a partir de una mezcla de arcillas, con magnesita, esteatita u olivino, manteniendo el contenido de hierro lo más bajo posible.

La **mullita** es utilizada para núcleos de bujías debido a su alta resistencia mecánica y a su composición final libre de vidrio. Puede fabricarse a partir de gibsita, diasporo o caolín.

La **porcelana de titanio**, especialmente los titanatos de tierras alcalinas han tomado gran importancia en aislamiento eléctrico. El óxido de titanio se puede combinar con talco o caolín para formar una pasta no porosa de titanatos de bario, estroncio y magnesio. Como están libres de álcalis, estas pastas presentan pérdidas dieléctricas inferiores a las de la esteatita, además presentan una constante dieléctrica muy superior. Estas características permiten la construcción de condensadores muy compactos, y su uso en el campo de las microondas, como medios ópticos para la propagación.

Las **porcelanas de zircón** tienen la ventaja de poseer unos coeficientes de expansión muy bajos, una alta resistencia al choque térmico, una muy alta resistencia mecánica y una fácil fabricación. Ellas representan una alternativa muy atractiva a las otras porcelanas. Soportan la acción corrosiva de metales fundidos ácidos y básicos.

De los óxidos aislantes más utilizados en aislamiento eléctrico **la alúmina, Al_2O_3** , es el mas ampliamente usado como material substrato para microelectrónica. Es de fácil fabricación y posee excelentes propiedades de aislamiento, alta resistencia mecánica, buena textura superficial e inercia química. Las composiciones de

alúmina para dichas aplicaciones varían entre 94% y 99% de contenido de Al_2O_3 con adición de vitrificantes tales como talco, arcillas y MgO para controlar sinterización y crecimiento de grano. La alta conducción térmica de la alúmina (segunda después del BeO como óxidos) es una característica fundamental para la disipación de calor y la resistencia al choque térmico en un denso circuito empacado, y es un hecho que, puede ser sinterizado hasta unas tolerancias dimensionales muy exigentes y con un excelente acabado final.

Los óxidos de berilio, BeO , encuentran uso muy extenso en aquellas aplicaciones que requieren disipación de calor significativa, tales como substratos microelectrónicos y circuitos de capa gruesa; por estas aplicaciones, es un competidor fuerte de la alúmina, pero su toxicidad y sus costos de fabricación limitan su uso.

De los otros óxidos aislantes en el sistema MgO y **espinel, $MgO.SiO_2$** , aunque son excelentes aislantes no son ampliamente utilizados debido a sus dificultades y altos costos de manufactura.

SiO_2 , es sin embargo, ampliamente utilizado como transductor piezoeléctrico en forma de un cristal simple y se usa también en aislamiento a altas temperaturas.

Zirconia, toria, hafnia y ceria, tienen usos muy especializados exceptuando la zirconia, la cual tiene aplicaciones en aislamiento, sensores de oxígeno y celdas de combustible. Para estas aplicaciones, **la zirconia** debe ser “estabilizada” con CaO o MgO (5 a 15 mol%) o con Y_2O_3 (2 a 6 mol%) para prevenir la transformación destructiva de fase monoclinico / tetragonal, la cual ocurre durante el calentamiento y el enfriamiento. La zirconia

exhibe una excelente resistencia mecánica, alta tenacidad y alta resistencia al desgaste y a la abrasión.

2.3 Otros aisladores

En el próximo Boletín Técnico estaremos presentando la segunda parte con otros aisladores tales como:

Espodumeno

Pirocerámica

Mica

Nitruro de silicio

Nitruro de aluminio

Nitruro de boro

Carburo de silicio

Igualmente se presentarán las características de los materiales dieléctricos de acuerdo a las normas internacionales.

Si desea cambiar su dirección electrónica, suscribir a un colega, solicitar ediciones anteriores o borrarse de la lista de distribución, envíenos un mensaje a:

carango@gamma.com.co

Atn Ing. Claudia Arango Botero.

Visítenos en nuestra página Web:
<http://www.gamma.com.co> o www.corona.com.co