

Materiales Dieléctrico Y Aislantes Segunda Parte Ingeniero Adolfo Cano Hencker

2.3 Otros aisladores

Aisladores en el sistema $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, incluyen el **espodumeno** ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$), el cual posee típicamente una contracción muy baja durante la sinterización (debido a la alta expansión de la fase β -espodumeno y a una expansión térmica cerca a cero o negativa. Para estos materiales, las propiedades dieléctricas se aproximan a las propiedades dieléctricas de las porcelanas feldespáticas, aunque los valores de resistencia mecánica tienden a ser inferiores, pero las propiedades de choque térmico son excelentes. La combinación de estas propiedades es muy ventajosa en el caso de que los aislamientos requieran estabilidad dimensional y estabilidad térmica.

Los materiales de **pirocerámica** contienen, tanto fase cristalina como fase vítrea, y por ello son considerados como vidrio-cerámica. Las propiedades dieléctricas de estos materiales tienden a ser similares a las de la fase vítrea, pero la parte cristalina imparte la resistencia mecánica. Estos materiales han sido desarrollados para aplicaciones en sustratos y ofrecen la ventaja de una fácil fabricación con dimensiones muy exactas. Las composiciones corresponden al sistema silicato de aluminio con álcalis o alcalinotérreos.

Otro material aislante importante es **la mica**, el cual está entre los mejores materiales aislantes y posee la más alta resistencia dieléctrica.

El nitruro de silicio, aunque inicialmente fue desarrollado para aplicaciones estructurales, tiene un enorme potencial para aplicaciones en microelectrónica, debido a sus excelentes propiedades dieléctricas y alta conducción térmica. Se utiliza como dieléctrico y como sustrato.

El nitruro de aluminio, tanto en forma de lámina delgada como gruesa se considera el material más utilizado en sustratos y microelectrónica. Sus principales ventajas son la alta conducción térmica (cercana a la del BeO), un bajo coeficiente de expansión térmica (cercano al Si), una baja densidad y unas excelentes propiedades dieléctricas aislantes. Presenta como desventajas una alta temperatura de sinterización (1800°C aproximadamente), una alta sensibilidad a las impurezas las cuales degradan sus propiedades de disipación de calor, presenta corrosión a alta temperatura bajo condiciones de humedad y oxidación, y tiene un elevado costo.

El nitruro de boro, en su modificación hexagonal, presenta una estructura similar a la del grafito y puede maquinarse muy fácilmente. Posee excelentes propiedades dieléctricas y de choque térmico y es utilizado como aislante tanto en forma de láminas delgadas o en bloques, aunque presenta dificultades para ligarlo.

El carburo de silicio ha emergido como un material cerámico no aluminoso muy prometedor para uso en electrónica. Se utiliza en sustratos en microelectrónica, circuitos integrados y fuentes de difusión planar.

3. Definiciones

Según la norma técnica Colombiana NTC 3982, equivalente a la norma IEC 60672-1: "Materiales aislantes de cerámica y vidrio. Parte 1: Definiciones y clasificación".-(6), las definiciones que aplican son las siguientes:

Material aislante: es un sólido de conductividad eléctrica despreciable, usado para separar partes conductoras de diferentes potenciales eléctricos.

Material aislante de cerámica: es un material inorgánico moldeado antes de cocerse, cuyos constituyentes principales usualmente comprenden silicatos policristalinos, aluminosilicatos, y compuestos de óxidos simples o complejos, por ejemplo titanatos. La definición también cubre ciertos materiales no oxidados tales como los nitruros de silicio.

Material aislante de vidrio: es un material inorgánico, usualmente una mezcla de óxidos producidos por fusión y subsecuente solidificación esencialmente sin cristalización.

Material de vidrio-cerámica: es un material aislante derivado de una carga de vidrio o vidrio en polvo, el cual se ha sometido a tratamiento de calor para inducir una cantidad sustancial de cristalinidad en una escala fina para convertir el material en un cuerpo policristalino.

Resistencia al choque térmico: (ΔT), es un término que describe la capacidad de un material o un componente para resistir cambios rápidos de temperatura sin pérdida de desempeño. Esta propiedad se determina normalmente por métodos que impliquen el traslado de un espécimen calentado, dentro de un baño de agua fría. El cambio máximo de temperatura que tolera un espécimen de dimensiones prescritas sin fracturarse, expresado en

grados kelvin, es llamado la resistencia al choque térmico para el propósito de la norma.

4. Clasificación y propiedades de materiales aislantes

La clasificación en subgrupos individuales (tipos de materiales) y los valores numéricos típicos de las propiedades están dados en la tabla No.4 para materiales aislantes de cerámica, en la tabla No.5 para materiales aislantes de vidrio-cerámica y vidrio-mica y en la tabla No.6 para materiales aislantes de vidrio. Estas tablas No. 4, 5 y 6 corresponden a las tablas No. 1, 2 y 3 de la norma NTC 4198 equivalente a la norma IEC 60672-3: "Especificaciones para materiales de cerámica y vidrio. Parte 3. Materiales individuales".-(7). La clasificación de materiales por esta norma se basa en el tipo y propiedades de composición. Existen nueve grupos de materiales aislantes de cerámica (designados con una letra "C" inicial), siete grupos de materiales aislantes de vidrio (designados con la letra "G"), un grupo de material aislante de vidrio-cerámica (designado con "CG"), y un grupo de material aislante mica-vidrio ligados designado con "GM". Las clases tienen el propósito de cubrir extensos tipos de material con propiedades adecuadas para las aplicaciones que se han desarrollado para ellos.

Los materiales que cumplen con esta norma satisfacen niveles de desempeño establecidos como se evaluaron en especímenes de ensayo para las propiedades pertinentes a la aplicación del material.

Bibliografía

- (1) Buchanam Relva C., "Ceramic Materials for Electronics processing, properties and applications"- 2nd edition. University of Illinois at Urbana.
- (2) Grimshaw R.W., "The chemistry and physics of clays and allied ceramics" - Fourth edition. John Wiley and Sons, Inc. NY.
- (3) Norton F.H., "Fine ceramics technology and applications". Massachusetts Institute of Technology, Mc Graw Hill book Co.
- (4) Haber R. A. And Smith P.A., "Overview of traditional ceramics". Rutgers, The State University of New Jersey.

- (5) Wood Rusell K., "Ceramic Whiteware". American Standard Inc.
- (6) Icontec, NTC 3982: "Materiales aislantes de cerámica y vidrio. Parte1: definiciones y clasificación". Instituto Colombiano de normas técnicas.
- (7) Icontec, NTC 4198: "Especificaciones para materiales aislantes de cerámica y vidrio. Especificaciones para materiales individuales". Instituto Colombiano de normas técnicas.
- (8) Kobayashi Y., Ohira O., Satoh T. And Kato E., "Compositions for strengthening porcelain bodies in alumina-feldspar-kaolin system"- British ceramic transaction. 1994-Vol 93 - No.2.
- (9) Ichinose Noboru,"Advances in electronic ceramic materials in Japan". Waseda University. IEEE Electrical Insulation magazine. May/June 1988. Vol 4- No.3.
- (10) Kingery W. D. "Introduction to ceramics". Massachussets Institute of Technology. John Wiley and Sons, Inc. NY.
- (11) Kirk Raymond E., Othmer Donald F., "Enciclopedia de tecnología química".Tomo IV. Cerámica. Unión tipográfica UTEHA:
- (12) Freiman Stephen W. "Introduction to ceramics and glasses". National Institute of Standards and Technology.
- (13) Cano Adolfo L., "Porcelana eléctrica y su característica de cero porosidad". Boletín Técnico No. 28. Electroporcelana Gamma S.A. Medellín, Colombia.

- 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

Tabla 4a. Materiales aislantes de cerámica: C-110 a C-140

			Grupo		C-100					
			Tipo		Porcelanas en aluminosilicatos alcalinos					
			Subgrupo		C-110	C-111	C-112	C-120	C-130	C-140
			Nombre		Porcelanas	Porcelanas	Porcelanas	Porcelana	Porcelana de	Porcelana
			silíceas proceso plástico	silíceas prensadas	crystalita proceso plástico	de alúmina	alúmina de alta resis- tencia mecánica	de litio		
Propiedades		Símbolo	Unidades							
Porosidad abierta(aparente), max		Pa	Volumen%	0.0	3	0.0	0.0	0.0	0.5	
Densidad volumétrica, mínimo		ρ_a	Mg.m ⁻³	2.2	2.2	2.3	2.3	2.5	2.0	
Resistencia a la flexión, sin esmalte		σ_{ft}	Mpa	50	40	80	90	140	50	
con esmalte		σ_{fg}	Mpa	60	..	100	110	160	60	
Módulo de elasticidad, mínimo		E	Gpa	60	..	70	..	100	..	
Coeficiente medio de expansión lineal	30°C a 100°C	α_{30-100}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	3 a 6	3 a 5	6 a 8	3 a 6	4 a 7	1 a 3	
	30°C a 300°C	α_{30-300}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	3 a 6	3 a 6	6 a 8	3 a 6	4 a 7	1 a 3	
	30°C a 600°C	α_{30-600}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	4 a 7	4 a 7	6 a 8	4 a 7	5 a 7	1 a 3	
	30° a 1000°C	$\alpha_{30-1000}$	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	..	..	..
Calor específico de 30°C a 100°C		Cp, 30-100	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	750 a 900	800 a 900	800 a 900	750 a 900	800 a 900	750 a 900	
Conductividad térmica 30°C a 100°C		λ_{30-100}	W/m ⁻¹ .K ⁻¹	1 a 2.5	1 a 2.5	1.4 a 2.5	1.2 a 2.6	1.5 a 4.0	1.0 a 2.5	
Resistencia al choque térmico, mín		ΔT	K	150	150	150	150	150	250	
Rigidez dieléctrica, mínimo		E _d	kV.mm ⁻¹	20	..	20	20	20	15	
Tensión sostenida, mínimo		U	kV	30	..	30	30	30	20	
Permitividad relativa de 48 Hz a 62 Hz		ϵ_r	..	6 a 7	..	5 a 6	6 a 7	6 a 7.5	5 a 7	
Cefic. Temperatura de permitividad		TK	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	600 a 500	..	600 a 500	600 a 500	600 a 500	..	
Factor de disipación a 20°C, max	48 a 62 Hz	tg ϵ_{pf}	10 ⁻³	25	..	25	25	30	10	
	1 KHz	tg ϵ_{1K}	10 ⁻³	..	..	..	..	..	..
	1MHz	tg ϵ_{1M}	10 ⁻³	12	..	12	12	15	10	
Resistividad volumétrica en términos de temperatura, mínimo	30°C	$\rho_{v,30}$	Ohm.m	10 ¹¹	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹¹	
	200°C	$\rho_{v,200}$	Ohm.m	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁷	
	600°C	$\rho_{v,600}$	Ohm.m	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	10 ²	
Temperatura mínima para una resis- tividad volumétrica de	1Megohm.m	T ϵ_{1}	°C	200	200	200	200	200	200	
	.01 Megohm.m	T $\epsilon_{0.01}$	°C	350	350	350	350	350	350	

Figura 4b. Materiales aislantes de cerámica: C-210 a C-250

Símbolo	Grupo	C-200					
	Tipo	Materiales basados en silicatos de magnesio (esteatitas y forsteritas)					
	Subgrupo	C-210	C-220	C-221	C-230	C-240	C-250
	Nombre	Esteatitas de baja tensión	Esteatitas normales	Esteatitas de bajas pérdidas	Esteatitas porosas	Forsteritas porosas	Forsteritas densas
Unidades							
Pa	Volumen%	0.5	0.0	0.0	35	30	0.0
ρ_a	Mg.m ⁻³	2.3	2.6	2.7	1.8	1.9	2.8
ρ_{ft}	Mpa	80	120	140	30	35	140
ρ_{fg}	Mpa	..	..	..	..	..	..
E	Gpa	60	80	110	..	..	..
α_{30-100}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	6 a 8	7 a 9	6 a 8	8 a 10	8 a 10	9 a 11
α_{30-300}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	6 a 8	7 a 9	7 a 9	8 a 10	8 a 10	9 a 11
α_{30-600}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	6 a 8	7 a 9	7 a 9	8 a 10	8 a 10	9 a 11
$\alpha_{30-1000}$	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	6 a 8	8 a 10	8 a 10	..	8 a 10	10 a 11
Cp, 30-100	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	800 a 900	800 a 900	800 a 900	800 a 900	800 a 900	800 a 900
ρ_{30-100}	W/m ⁻¹ .K ⁻¹	1 a 2.5	2 a 3	2 a 3	1.5 a 2	1.4 a 2	3 a 4
ρ_T	K	80	80	100	..	..	80
E _d	kV.mm ⁻¹	..	15	20	..	..	20
U	kV	..	20	30	..	..	30
ρ_r	..	6	6	6	..	..	7
TK ρ	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	160 a 70	160 a 70	160 a 70	..	..	..
tg ρ_{pf}	10 ⁻³ .	25	5	1.5	..	..	1.5
tg ρ_{1K}	10 ⁻³.	..	..	..	..	..	..
tg ρ_{1M}	10 ⁻³ .	7	3	1.2	..	..	0.5
$\rho_{v,30}$	Ohm.m	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ¹¹	..	..	10 ¹¹
$\rho_{v,200}$	Ohm.m	10 ⁷	10 ⁸	10 ⁹	10 ⁸	10 ⁹	10 ⁹
$\rho_{v,600}$	Ohm.m	10 ³	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵
T ρ_1	°C	200	350	500	500	500	500
T $\rho_{0.01}$	°C	400	530	800	800	800	800

Tabla 4c. Materiales aislantes de cerámica: C-310 a C-351

	Grupo	C-300						
	Tipo	Titanatos y otros materiales cerámicos de alta permitividad						
	Subgrupo	C-310	C-320	C-330		C-340	C-350	C-351
	Nombre	Basados en	Titanato de	Titanio y otros óxidos		Titanato de	Basados en perovskitas	
Símbolo	Unidades	óxido de titanio	magnesio	C-330	C-331	Bi, Sr y Ca	ϵ_r medio	ϵ_r alto
Pa	Volumen%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ρ_a	Mg.m ⁻³	3.5	3.1	4.0	4.5	3.0	4.0	4.0
ρ_{ft}	Mpa	70	70	80	80	70	50	50
ρ_{fg}	Mpa	..	..	..	..	..	..	..
E	Gpa	..	..	..	..	..	..	..
α_{30-100}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	6 a 8	6 a 10	..	..	..	..	..
α_{30-300}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	..	..	..	..
α_{30-600}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	..	..	..	..
$\alpha_{30-1000}$	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	..	..	..	..
Cp, 30-100	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	700 a 800	900 a 1000	..	..	..	..	..
ρ_{30-100}	W/m ⁻¹ .K ⁻¹	3 a 4	3.5 a 4	..	..	..	..	..
α_T	K	..	..	..	..	..	..	..
E _d	kV.mm ⁻¹	8	8	10	10	6	2	2
U	kV	15	15	15	15	8	2	2
ϵ_r	..	40 a 100	12 a 40	25 a 50	30 a 70	100 a 700	350 a 3000	>3000
TK α	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	-280 a - 900	+130 a -150	+70 a -120	+120 a -700	-1200 a -6000	..	..
tg α_{pf}	10 ⁻³.	..	..	..	..	..	..	..
tg α_{1K}	10 ⁻³ .	6.5	2	20	7	..	..	..
tg α_{1M}	10 ⁻³ .	2	1.5	0.8	1.0	5	35	35
$\rho_{v,30}$	Ohm.m	10 ¹⁰	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁸	10 ⁸
$\rho_{v,200}$	Ohm.m	..	..	..	..	..	..	..
$\rho_{v,600}$	Ohm.m	..	..	..	..	..	..	..
T α_1	°C	..	..	..	..	..	..	..
T $\alpha_{0.01}$	°C	..	..	..	..	..	..	..

Tabla 4d. Materiales aislantes de cerámica: C-410 a C-530

Símbolo	Grupo	C-400				C-500				
	Tipo	Materiales basados en silicatos alcalinotérreos y porcelanas de zircón				Materiales basados en silicatos de aluminio y magnesio				
	Subgrupo	C-410	C-420	C-430	C-440	C-510	C-511	C-512	C-520	C-530
	Nombre	Cordierita	Celsia	Caliza	Zircón	Silic.aluminio sin cordierita	Silicato de aluminio y magnesio		Basado en cordierita	Silic.aluminio con alúmina
Unidades	densa	densa	densa	denso						
Pa	Volumen%	0.5	0.5	0.5	0.5	30	20	40	20	30
□a	Mg.m ⁻³	2.1	2.7	2.3	2.5	1.9	1.9	1.8	1.9	2.1
□ft	Mpa	60	80	80	100	25	25	15	30	30
□fg	Mpa	..	..	..	..		..		..	..
E	Gpa	..	..	80	130		..	..	40	..
□ ₃₀₋₁₀₀	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	1 a 3	3 a 5	5 a 7	5 a 7	3 a 5	3 a 6	3 a 5	1.5 a 3.5	3.5 a 5
□ ₃₀₋₃₀₀	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	1 a 3	3 a 5	5 a 7	5 a 7	3 a 5	3 a 6	3 a 5	1.5 a 3.5	3.5 a 5
□ ₃₀₋₆₀₀	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	2 a 4	3.5 a 6	..	..	3 a 6	4 a 6	3 a 6	2 a 4	4 a 6
□ ₃₀₋₁₀₀₀	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	2 a 4.5	4 a 7	..	..	3 a 6	4 a 6	3.5 a 6	2.5 a 5	4 a 7
Cp, ₃₀₋₁₀₀	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	800 a 1200	800 a 1000	700 a 850	550 a 650	750 a 850	750 a 850	750 a 900	750 a 900	800 a 900
□ ₃₀₋₁₀₀	W/m ¹ .K ⁻¹	1.2 a 2.5	1.5 a 2.5	1 a 2.5	5 a 8	1.2 a 1.7	1.3 a 1.8	1 a 1.5	1.3 a 1.8	1.4 a 2.0
□T	K	250	200	150	150	150	200	250	300	350
E _d	kV.mm ⁻¹	10	20	15	15	..	..	..	..	2
U	kV	15	30	20	20	..	..	..	..	..
□ _r	..	5	7	6 a 7	8 a 12	..	..	..	..	..
TK□	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	+600 a +500	+100 a +30	..	..	..	..	..	..	..
tg □ _{pf}	10 ⁻³ .	25	10	5	5	..	..	..	..	..
tg □ _{1K}	10 ⁻³ .	..	12	..	..	..	..	..	..	..
tg □ _{1M}	10 ⁻³ .	7	0.5	5	5	..	..	..	..	..
□ _{v,30}	Ohm.m	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹¹	10 ¹¹					
□ _{v,200}	Ohm.m	10 ⁶	10 ¹¹	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁸
□ _{v600}	Ohm.m	10 ³	10 ⁷	10 ²	10 ²	10 ³	10 ³	10 ³	10 ³	10 ⁴
T□ ₁	°C	200	600	200	200	..	..	..	..	..
T□ _{0.01}	°C	400	900	350	350	500	500	500	500	600

Tabla 4e. Materiales aislantes de cerámica: C-610 a C-799

	Grupo	C-600		C-700			
	Tipo	Cerámicas de mullita de bajo contenido de álcalis		Cerámicas de alto contenido de alúmina			
	Subgrupo	C-610	C-620	C-780	C-786	C-795	C-799
	Nombre	Contenido de Al ₂ O ₃		Contenido de Al ₂ O ₃			
Símbolo	Unidades	50% a 65%	65% a 80%	80% a 86%	86% a 95%	95% a 99%	> 99%
Pa	Volumen%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ρ_a	Mg.m ⁻³	2.6	2.8	3.2	3.4	3.5	3.7
ρ_{ft}	Mpa	120	150	200	250	280	300
ρ_{fg}	Mpa	..	..	..	..	..	..
E	Gpa	100	150	200	220	280	300
α_{30-100}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	5 a 6	5 a 6	5 a 7	5.5 a 7.5	5 a 7	5 a 7
α_{30-300}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	5 a 6	5 a 6	5 a 7	6 a 8	6 a 7.5	6 a 8
α_{30-600}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	5 a 7	5 a 7	6 a 8	6 a 8	6 a 8	7 a 8
$\alpha_{30-1000}$	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	5 a 7	5 a 7	7 a 8	7 a 8	7 a 9	7 a 9
Cp ₃₀₋₁₀₀	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	850 a 1050	850 a 1050	850 a 1050	850 a 1050	850 a 1050	850 a 1050
λ_{30-100}	W/m ⁻¹ .K ⁻¹	2 a 6	6 a 15	10 a 16	14 a 24	16 a 28	19 a 30
τ_T	K	150	150	140	140	140	150
E _d	kV.mm ⁻¹	17	15	10	15	15	17
U	kV	25	20	15	18	18	20
ρ_r	..	8	8	8	9	9	9
TK α	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	..	..	..
tg ρ_{pf}	10 ⁻³.	..	..	1.0	0.5	0.5	0.2
tg ρ_{1K}	10 ⁻³.	..	..	1.5	1	1	0.5
tg ρ_{1M}	10 ⁻³ .	7	3	1.5	1	1	1
$\rho_{v,30}$	Ohm.m	10 ¹¹	10 ¹¹	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²
$\rho_{v,200}$	Ohm.m	10 ⁹	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹⁰
$\rho_{v,600}$	Ohm.m	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
T ρ_1	°C	300	300	400	500	500	500
T $\rho_{0.01}$	°C	600	600	700	800	800	800

Tabla 4f. Materiales aislantes de cerámica: C-810 a C-935

Símbolo	Grupo	C-800		C-900			
	Tipo	Cerámicas de un solo óxido diferente a alúmina		Cerámicas aislantes sin óxidos			
	Subgrupo	C-810	C-820	C-910	C-920	C-930	C-935
	Nombre	Cerámicas de berilo denso	Cerámicas de magnesio	Nitruros de aluminio	Nitruros de boro	Nitruros de silicio ligados	Nitruros de silicio denso
Unidades							
Pa	Volumen%	0.0	3.0	0.0	2.0	4.0 *	0.0
$\square a$	Mg.m ⁻³	2.8	2.5	3.0	2.5	1.9	3.0
$\square ft$	Mpa	150	50	200	20	80 *	300
$\square fg$	Mpa	..	..	..	..	..	..
E	Gpa	300	90	300	..	80	250
\square_{30-100}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	5 a7	8 a 9	2.5 a 4	**	1 a 2	1 a 2
\square_{30-300}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	5.5 a 7.5	10 a 12	4 a 4.5	**	2 a 3	2 a 3
\square_{30-600}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	7 a 8.5	11 a 13	4.5 a 5	**	2.5 a 3.5	2.5 a 3.5
$\square_{30-1000}$	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	8 a 9.5	12 a 14	5.5 a 6	..**	3.0 a 3.5	2.5 a 3.5
Cp ₃₀₋₁₀₀	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	1000 a 1250	850 a 1050	800 a 900	900 a 1050	750 a 850	750 a 850
\square_{30-100}	W/m ⁻¹ .K ⁻¹	150 a 220	6 a 10	> 100	10 a 50 **	5 a 15 *	15 a 45
$\square T$	K	180	..	200	..	250	250
E _d	kV.mm ⁻¹	13	..	20	..	..	20
U	kV	20	..	30	..	..	30
$\square r$	..	7	10	..	..	..	8 a12
TK \square	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	..	..	..
tg \square_{pf}	10 ⁻³ .	1	..	2	2	2	2
tg \square_{1K}	10 ⁻³ .	1	..	..	..	..	..
tg \square_{1M}	10 ⁻³ .	1	..	2	2	2	2
$\square_{v,30}$	Ohm.m	10 ¹²	..	10 ¹²	10 ¹²	..	10 ¹¹
$\square_{v,200}$	Ohm.m	10 ¹⁰	..	10 ¹⁰	10 ¹⁰	..	10 ⁷
$\square_{v,600}$	Ohm.m	10 ⁷	..	10 ⁵	10 ⁶	..	10 ²
T \square_1	°C	600	600	500	500	..	200
T $\square_{0.01}$	°C	900	1000	800	800	..	300

* Depende de la densidad volumétrica

** Depende de la dirección relativa a la de prensado en caliente

Tabla 5. Materiales aislantes de vidrio-cerámica y vidrio-mica: GC-100 a GM-120

		Grupo	GC-100		GM-100		
		Tipo	Materiales de vidrio - cerámica		Materiales de mica ligados con vidrio		
		Subgrupo	GC-100	GC-120	GM-100	GM-120	
		Nombre	Vidrio-cerámica nucleado	Vidrio-cerámica-aglutinado	Micas ligadas con vidrio	Cerámica-vidrio con mica	
Propiedades	Símbolo	Unidades					
Porosidad abierta(aparente), max	Pa	Volumen%	0.0	0.0	0.5	0.5	
Densidad volumétrica, mínimo	ρ_a	Mg.m ⁻³	..	..	2.2	2.2
Resistencia a la flexión, sin esmalte	σ_{ft}	Mpa	50	50	50	50	
con esmalte	σ_{fg}	Mpa	..	..	..	..
Módulo de elasticidad, mínimo	E	Gpa	50	50	40	50	
Coeficiente medio de expansión lineal	30°C a 100°C	α_{30-100}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..*	..*	7 a 12	7 a 12
	30°C a 300°C	α_{30-300}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..*	..*	7 a 12	7 a 12
	30°C a 600°C	α_{30-600}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..*	..*
	30° a 1000°C	$\alpha_{30-1000}$	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..*	..*
Calor específico de 30°C a 100°C	Cp, 30-100	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	..	..	..	..
Conductividad térmica 30°C a 100°C	λ_{30-100}	W/m ⁻¹ .K ⁻¹	1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5	
Resistencia al choque térmico, mín	σ_T	K	..	..	100	100
Rigidez dieléctrica, mínimo	E _d	kV.mm ⁻¹	20	15	10	10	
Tensión sostenida, mínimo	U	kV	30	20	15	15	
Permitividad relativa de 48 Hz a 62 Hz	ϵ_r	..	..	..	..	..
Cefic. Temperatura de permitividad	TK ϵ	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	..
Factor de disipación a 20°C, max	48 a 62 Hz	tg ϵ_{pf}	10 ⁻³
	1 KHz	tg ϵ_{1K}	10 ⁻³
	1MHz	tg ϵ_{1M}	10 ⁻³
Resistividad volumétrica en términos de temperatura, mínimo	30°C	$\rho_{v,30}$	Ohm.m	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ⁹	10 ⁹
	200°C	$\rho_{v,200}$	Ohm.m
	600°C	$\rho_{v,600}$	Ohm.m
Temperatura mínima para una resistividad volumétrica de	1Megohm.m	T ρ_{1}	°C	200	200	150	200
	.01 Megohm.m	T $\rho_{0.01}$	°C	300	300	200	300

Tabla. 6a. Materiales aislantes de vidrio: G-110 a G-232

		Grupo	G-100		G-200			
		Tipo	Vidrios de álcalis caliza - sílice		Vidrios de borosilicato			
		Subgrupo	G-110	G-120	G-220	G-231	G-232	
		Nombre	Recocido	Térmicamente reforzado	Químicamente resistente	Bajas pérdidas	Alta tensión	
Propiedades		Símbolo	Unidades					
Densidad volumétrica, mínimo		ρ_a	Mg.m ⁻³	2.4	2.4	2.2	2.2	2.3
Resistencia a la flexión, sin esmalte		ρ_{ft}	Mpa	30	150	30	30	30
Módulo de elasticidad, mínimo		E	Gpa	70	70	60	60	70
Coeficiente medio de expansión lineal	30°C a 100°C	α_{30-100}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	8 a 9.5	8 a 9.5	3 a 5	..	..
	30°C a 300°C	α_{30-300}	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	8.5 a 10	8.5 a 10	3 a 5	4.6 a 5.1	4.6 a 5.5
Temperatura de transición del vidrio		Tg	°C	500 a 560	500 a 560	520 a 560	480 a 510	..
Rigidez dieléctrica, mínimo		E _d	kV.mm ⁻¹	25	25	30	30	30
Tensión sostenida, mínimo		U	kV	25	25	30	30	30
Permitividad relativa de 48 Hz a 62 Hz		ϵ_r	..	6.5 a 7.6	7.3 a 7.6	4.0 a 5.5	4.9 a 5.5	5 a 6
Cefic. Temperatura de permitividad		TK ϵ	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	3 a 20	3 a 20	2 a 10	..	..
Factor de disipación a 20°C, máximo	48 a 62 Hz	tg ϵ_{pf}	10 ⁻³ .	30	60	20	3.5	30
	1 KHz	tg ϵ_{1K}	10 ⁻³ .	20	60	10	2.5	12
	1MHz	tg ϵ_{1M}	10 ⁻³ .	10	60	10	2.0	8
Resistividad volumétrica en términos de temperatura, mínimo	30°C	$\rho_{v,30}$	Ohm.m	10 ¹⁰	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²
	200°C	$\rho_{v,200}$	Ohm.m	10 ⁷	10 ⁷	10 ⁷	10 ¹⁰	10 ⁷
	600°C	$\rho_{v,600}$	Ohm.m	..	..	..	..	..
Temperatura mínima para una resistividad volumétrica de	1Megohm.m	T ρ_1	°C	170	170	250	350	200
	.01 Megohm.m	T $\rho_{0.01}$	°C	280	280	400	480	350

Tabla 6b. Materiales aislantes de vidrio: G-400 a G-799

			Grupo	G-400	G-500	G-600	G-700	
			Tipo	Vidrio alúmina caliza sílice	Vidrio de plomo álcalis sílice	Vidrio de álcalis bario sílice	Vidrios de alta sílice	
			Subgrupo				G-795	G-799
			Nombre				95 a 99%	> 99%
Propiedades	Símbolo	Unidades					SiO ₂	SiO ₂
Densidad volumétrica, mínimo	□ a	Mg.m ⁻³	2.5	2.8	2.6	2.1	2.1	
Resistencia a la flexión, sin esmalte	□ ft	Mpa	40	30	30	30	30	
Módulo de elasticidad, mínimo	E	Gpa	80	60	70	70	70	
Coeficiente medio de expansión lineal	30°C a 100°C	□ 30-100	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	0.5 a 1	0.5 a 0.7
	30°C a 300°C	□ 30-300	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	4 a 4.6	8 a 10	9 a 10	0.5 a 1	0.5 a 0.7
Temperatura de transición del vidrio	Tg	°C	620 a 730	430 a 470	430 a 500	600 a 700	> 700	
Rigidez dieléctrica, mínimo	E _d	kV.mm ⁻¹	30	..	..	30	30	
Tensión sostenida, mínimo	U	kV	30	..	..	30	30	
Permitividad relativa de 48 Hz a 62 Hz	□ r	..	5.5 a 7.5	6 a 8	6.5 a 7.5	3.5 a 4.0	3.7 a 3.9	
Cefic. Temperatura de permitividad	TK□	10 ⁻⁶ .K ⁻¹	..	..	..	0.1	0.5	
Factor de disipación a 20°C, máximo	48 a 62 Hz	tg □ pf	10 ⁻³ .	2.5	3	4	1.0	0.5
	1 KHz	tg □ 1K	10 ⁻³ .	2.5	2.5	..	1.0	0.5
	1MHz	tg □ 1M	10 ⁻³ .	3	2	2.5	1.0	..
Resistividad volumétrica en términos de temperatura, mínimo	30°C	□ v,30	Ohm.m	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²	10 ¹²
	200°C	□ v,200	Ohm.m	10 ¹⁰	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁹	10 ⁸
	600°C	□ v600	Ohm.m	..	..	..	10 ⁻³	10 ⁴
Temperatura mínima para una resistividad volumétrica de	1Megohm.m	T□ ₁	°C	430	280	250	350	450
	.01 Megohm.m	T□ _{0.01}	°C	600	430	400	450	600