



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
EL57C – Taller de Diseño en Sistemas de Potencia I

# **Porcelana y su aplicación en la Industria Eléctrica.**

**Autores:**

Nicolás Ramos O.  
Rodrigo Sepúlveda S.  
Ariel Yung M.

**Profesor:**

Alberto Botteselle D.

Santiago, 28 de Agosto de 2008.

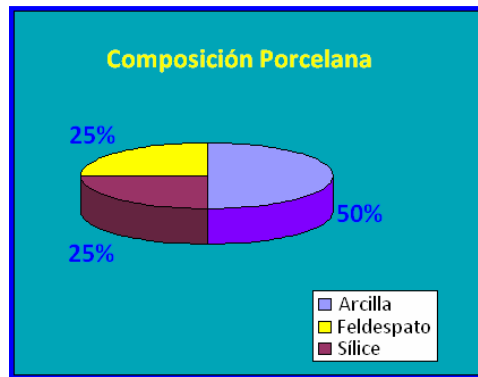
## Índice

<i>I. Materias Primas.....</i>	<i>3</i>
<i>II. Proceso de Producción.....</i>	<i>5</i>
<i>III. Propiedades de la Porcelana.....</i>	<i>8</i>
<i>IV. Aplicación de la Porcelana en la Industria Eléctrica.....</i>	<i>11</i>
<i>Normas Aplicables.....</i>	<i>11</i>
<i>Tipos de Aisladores.....</i>	<i>12</i>
<i>V. Empresas Consultadas .....</i>	<i>14</i>
<i>Bibliografía.....</i>	<i>14</i>

## I. Materias Primas

La típica porcelana eléctrica consta aproximadamente de un 50% de arcilla. Esta composición hace que el material tenga una buena plasticidad en estado crudo y un margen amplio de temperaturas de tratamiento térmico, siendo su precio relativamente bajo. La mayor desventaja de los materiales aislantes eléctricos es su alto factor de pérdida comparado con otros materiales aislantes eléctricos, que se debe a la alta movilidad de los iones alcalinos.

Aun cuando son porcentajes fáciles de manejar mentalmente, es interesante estudiarlos de manera visual, de forma tal de fijar ideas. Para esto se adjunta la figura siguiente.



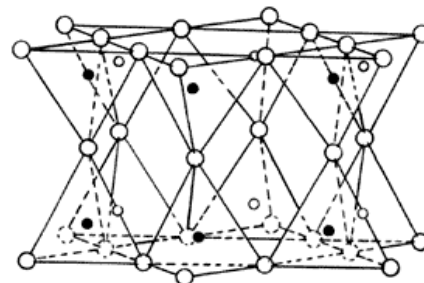
**Figura 1: Porcentaje Composición Porcelana.**

Es importante describir, aunque sea de manera muy superficial cada una de las rocas que forman parte de los ingredientes usados en la receta de la porcelana. La primera, y la más abundante, es la arcilla, que como tal corresponde a un grupo de rocas, siendo en particular la Caolinita o caolín, la usada en el proceso estudiado.

La caolinita, de fórmula química  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , corresponde a una piedra de grano muy fino. Es muy abundante, al punto de ser la parte mayoritaria de lo que es conocido vulgarmente como "suelo". Su formación viene de la meteorización química (actuación del ambiente sobre una roca) de las rocas, más en específico de la hidrólisis. Por ser una roca sedimentaria (acumulación de granos) de características químicas como las que tiene, posee una estructura laminar en su disposición física, lo que se muestra en la figura siguiente



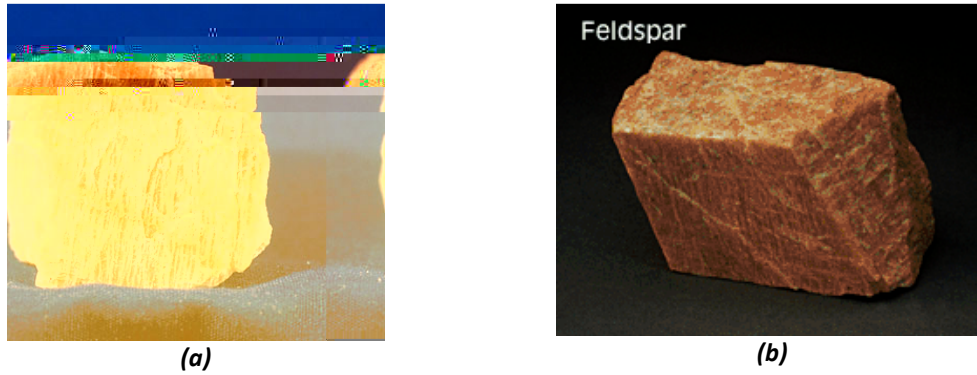
**(a)**



**(b)**

**Figura 2: Caolinita, a) Roca de Caolinita, b) Estructura Laminar.**

Los feldespatos en tanto, son de muy variados tipos, dependiendo de la presión y temperatura a la que se forman. Los hay hechos con diferentes mezclas de minerales siendo los más conocidos los grupos de feldespatos potásicos y feldespatos plagioclasas. Se encuentran tanto solos como partes integrantes de otras rocas.



**Figura 3: Rocas de Feldspato,**  
**a) Feldspato Plagioclase, b) Feldspato Potásico.**

Finalmente, se tiene el cuarzo hecho puramente de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), que corresponde a un pilar fundamental de muchísimas rocas, conocidas como silicatos. La gran característica del cuarzo es la dureza que tiene y relacionado a esto, la gran capacidad de soportar la meteorización. Se suele encontrar como parte de otras rocas, aunque existen también yacimientos de cuarzo puro. Tiene además la cualidad de que si se dan las condiciones de que “no haya apuro” en su cristalización, se logran formas hexagonales muy hermosas y de gran valor comercial.



**Figura 4: Rocas de Cuarzo,**  
**a) Cristalizado en hexágonos, b) Cristalizado con más “apuro”**

## II. Proceso de Producción.

Se sabe que aun cuando tradicionalmente se utilizan Caolín (Caolinita), Feldespato y Sílice en la producción de la porcelana, también le son agregados otros elementos en la fabricación. Esto con el objetivo de obtener distintas características en la porcelana resultante. Por ejemplo la siguiente tabla muestra las materias primas adicionales utilizadas en la elaboración de porcelana en la industria nacional.

Tabla n°1: Materias primas empleadas por la industria nacional.

Materia prima	% p/p
Caolín	40.0
Feldespato	30.0
Arcillas	30.0
Cuarzo	15.0
Arena Sicilia	15.0
Esmalte	10.0
Yeso	10.0
Dolomita	5.0
Carbonato de calcio	5.0
Fritas	3.0
Opacificantes	1.0
Calizas	1.0
Silicato de circonio	1.0
Oxidos de zinc	0.5
Silicato de sodio	0.5
Pigmento	0.1

Fuente Catastro SISS 1998.

El proceso de fabricación como tal, está compuesto por una serie de etapas, las cuales están esquematizadas en el diagrama siguiente:

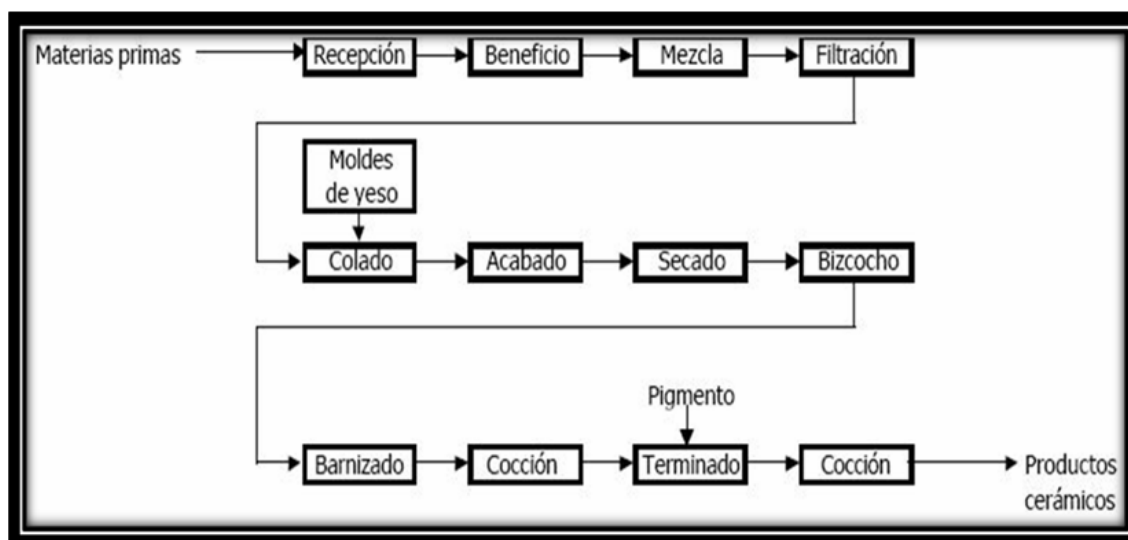


Figura 5: Proceso de Fabricación.

Se procede a continuación a describir someramente cada una de las fases asociadas al logro del producto final.

*a) Recepción.*

Las materias primas son transportadas y almacenada en las dependencias de la industria.

*b) Beneficio.*

El proceso de beneficio incluye la pulverización, purificación, tamizado, clasificación, calcinación, dispersión en líquido y granulación. Lo usual es que la materia prima natural sea sometida a un grado de beneficio en su lugar de extracción o en otra instalación antes de ser transportado a la industria del rubro cerámico.

*c) Mezcla.*

El agua es el líquido más comúnmente empleado en la mezcla. Algunos agentes para ayudar el proceso son añadidos a la mezcla cerámica, tales como defloculantes, surfactantes y antiespumante.

Los defloculantes mejoran la dispersión y su estabilidad. Los agentes surfactantes son usado en el procesamiento en pasta para ayudar a la dispersión. Los agentes antiespumante son usados para remover las burbujas de gas atrapadas de la pasta. Para extraer fácilmente el aire, también se suele amasar la pasta en prensas al vacío y pasar a presión por orificios que conducen a una cámara sin aire, donde unas cuchillas giratorias cortan finalmente la pasta.

*d) Colado o torneado.*

En la etapa de colado las mezclas, son consolidadas y moldeadas para producir la cohesión del cuerpo, de un tamaño y forma deseada. El colado de cerámicas se logra generalmente mediante vaciado. En la operación de vaciado una mezcla que tiene un contenido de humedad de 20 a 35%, es vertida en un molde poroso. La succión capilar del molde conduce el líquido del molde, consolidando así el material cerámico repartido.

*e) Acabado.*

La pieza de cerámica pasa por una máquina para eliminar las asperezas de la superficie o las vetas, o para modificar la forma. Los métodos empleados incluyen equipos de desgaste superficial, que suavizan la superficie de la cerámica, y de perforación para dar forma, crear hoyos o cavidades.

*f) Secado.*

El método más comúnmente usado para secar la cerámica es por convección, en la cual el aire caliente se hace circular alrededor de la cerámica. A menudo el secado con aire es realizado en hornos de túnel, los que por lo general usan calor recuperado de la zona de enfriamiento del horno.

*g) Bizcocho.*

Previo a la cocción, a menudo las cerámicas son tratadas con calor a temperaturas por debajo de la temperatura de cocción. El propósito de este procesamiento térmico es proporcionar un secado adicional, vaporizar o descomponer aditivos orgánicos y otras impurezas, y remover agua residual que esta en forma de cristales o que este unida químicamente.

*h) Barnizado.*

EL barniz se aplica a las cerámicas ya sea por rociado o inmersión. El rociado es probablemente el método más común de aplicación de barniz en la industria cerámica. La inmersión es un proceso antiguo de aplicación de barniz, y generalmente es usado solamente en formas que no se puede abordar con el rociamiento.

*i) Cocción.*

La cocción es el proceso mediante el cual la cerámica es consolidada térmicamente en un cuerpo denso y cohesivo constituido por granos finos y uniformes. Los parámetros de operación que afectan la cocción incluyen la temperatura de cocción, el tiempo, la presión y la atmósfera.

El método de cocción convencional se logra mediante el calentamiento de la cerámica cruda a una temperatura aproximada de dos tercio de la de fusión, a presión atmosférica, y manteniéndola por un tiempo específico en un horno túnel o periódico. Los hornos periódicos son calentados y enfriados de acuerdo con un programa prescrito. Los hornos de túnel tienen generalmente zonas separadas para el enfriamiento, la cocción y precalentamiento o secado.

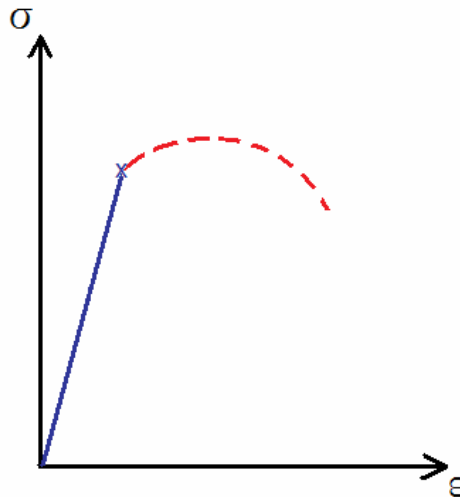
*j) Terminado.*

Con posterioridad a la cocción, algunos productos cerámicos son procesados aún más para potenciar sus características. La decoración se hace con calcomanías especiales, con partículas de materiales que permiten su total adherencia a la pieza de cerámica, con pigmentos de colores, con oro, platino, cobalto o también se puede decorar a mano con pigmentos especiales. Una vez hecha la decoración, y dependiendo de cual ha sido, la pieza pasa por un tercer horno a diferentes temperaturas. Esta cocción impregna la decoración a la cerámica y pasa a ser un todo con la cerámica, lo que permite que resista el contacto con el agua y el calor.

### III. Propiedades de la Porcelana

- La porcelana es un material cerámico de estructura vidriosa.
- Tiene un bajo coeficiente de expansión térmica, lo que significa que se expande poco con la temperatura.
- Mecánicamente es un material frágil, de alto módulo de elasticidad: Soporta altos esfuerzos sin deformarse elásticamente y, por tratarse de un material frágil, su curva de esfuerzo-deformación carece de la zona de deformación plástica.

A continuación se muestra de forma cualitativa esta curva:



*Figura 6: Curva Cualitativa de Esfuerzo – Deformación.*

La curva de un material dúctil posee ambas zonas, mientras que uno frágil sólo la parte correspondiente a la recta.

La porcelana eléctrica posee gran resistencia mecánica a la flexión y a la compresión y una buena resistencia a la torsión y tracción.



Tabla n°2: Propiedades Mecánicas de la Porcelana Eléctrica.

Características	Por Vía Seca	Por Vía Húmeda	Colada
Resistencia a la tracción, en Kg/cm <sup>2</sup> (con esmaltado)	100 - 140	300 - 500	-
Resistencia a la tracción, en Kg/cm <sup>2</sup> (sin esmaltado)	70 - 140	240 - 300	-
Resistencia a la compresión en Kg/cm <sup>2</sup> (con esmaltado)	3000 - 4000	4000 - 5500	4000 - 5500
Resistencia a la compresión en Kg/cm <sup>2</sup> (sin esmaltado)	3000 - 3500	4000 - 4500	4000 - 4500
Resistencia a la flexión en Kg/cm <sup>2</sup> (con esmaltado)	600 - 700	900 - 1000	900 - 1000
Resistencia a la flexión en Kg/cm <sup>2</sup> (sin esmaltado)	300 - 600	400 - 800	400 - 800

En cuanto a sus propiedades dieléctricas se refiere, estas son excelentes. Posee una constante dieléctrica, a 60 Hz, de aproximadamente 6. Esto quiere decir que si se utilizara la porcelana como dieléctrico en un condensador de placas paralelas, la capacidad de éste es 6 veces mayor que si se tuviera vacío entre ellas.

Su *rigidez dieléctrica*, es decir, la capacidad que tiene el material para albergar energía a altos voltajes, y viene dada por el voltaje que soporta por unidad de longitud justo antes de que se produzca una descarga a través de él.

El material también tiene asociado el llamado *factor de pérdidas*, que es una medida de la energía eléctrica que se pierde en forma de calor por un condensador en un circuito de corriente alterna.

Está definido por el producto  $\kappa \cdot \tan \delta$ , donde  $\kappa$  es la constante dieléctrica y  $\delta$  el ángulo de desfase entre la corriente sinusoidal inducida en un condensador con éste dieléctrico y la inducida con un dieléctrico libre de pérdidas.

A continuación se muestra una tabla con valores de estas propiedades dieléctricas para la porcelana y otros materiales:

Tabla n°3: Propiedades Dieléctricas de la Porcelana y Otros Materiales.

Material	Resistividad	Rigidez Dieléctrica	Constante Dieléctrica $\kappa$		Factor de Pérdidas	
	$[\Omega \cdot m]$	kV/mm	60 Hz	1 Mhz	60 Hz	1 MHz
Porcelana Eléctrica	$10^{12}$ a $10^{13}$	2 a 12	6	-	0,06	
Esteatita	$> 10^{12}$	6 a 11	6	6	0,008 a 0,090	0,007 a 0,025
Fosterita	$> 10^{12}$	9,8	-	6	-	0,001 a 0,002
Alúmina	$> 10^{12}$	9,8	-	9	-	0,0008 a 0,009
Vidrios soda-cálcicos	-	-	-	7,2	-	0,009
Sílice Fundida	-	-	-	3,8	-	0,00004

Todas las propiedades mencionadas hasta ahora variarán según la composición de la porcelana.

La proporción en la que se encuentren los feldespatos, cuarzo o sílice y arcilla o caolines determinarán las propiedades mecánicas, térmicas y dieléctricas de la porcelana, según el diagrama que se muestra a continuación:

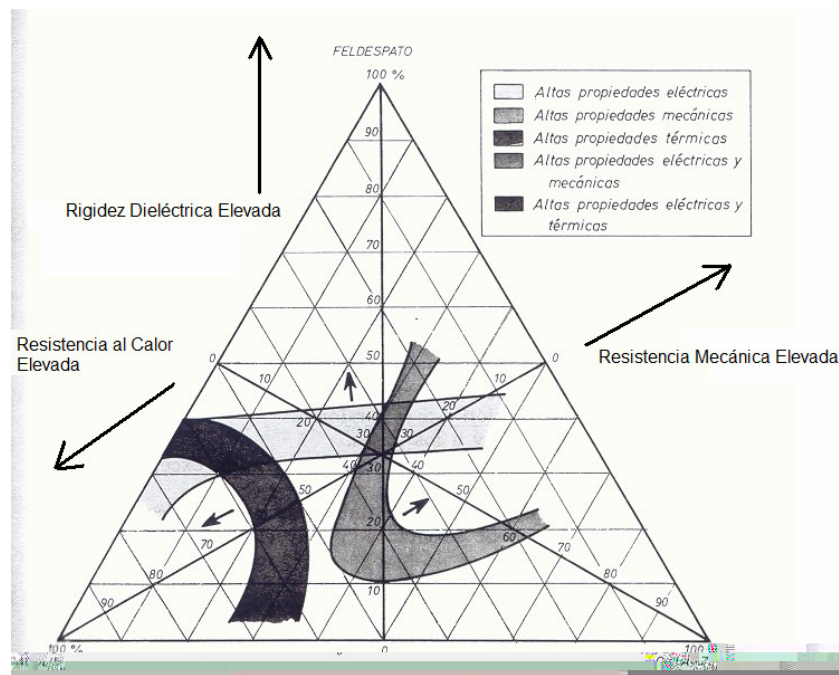


Figura 7: Influencia de la Proporción de Componentes Básicos en las Propiedades de la Porcelana Electrotécnica.

## IV. Aplicación de la Porcelana en la Industria Eléctrica.

La porcelana es ampliamente utilizada en la Industria Eléctrica como material base para fabricar aisladores, sus propiedades dieléctricas y mecánicas son ideales para efectuar la tarea de aislamiento en líneas de transmisión y en equipos eléctricos, tales como transformadores, banco de condensadores, desconectadores, etc.

Este material comenzó a ser utilizado en la industria de aisladores alrededor del año 1960-70 en Europa y Estados Unidos, posteriormente Japón comenzó a avanzar en esta industria. El creciente avance de la industria eléctrica y el creciente uso de cada vez más altas tensiones, llevó a mayores requerimientos de aislamiento, progresando gracias a esto la industria de aisladores de porcelana.

Se utiliza en una amplia gama de tensiones: en BT se pueden apreciar en las líneas de distribución o en líneas de telecomunicaciones; en MT, en las líneas de de distribución de 13 o 23 kV; y en AT en equipos como transformadores y desconectadores.

Sus formas y tamaños dependen de diversos factores:

- Tensión a soportar: Define principalmente su tamaño, en longitud y ancho.
- Factores mecánicos.
- Factores Ambientales: varían su forma dependiendo de la salinidad, presencia de niebla, sectores secos, húmedos, polución, etc.

### Normas Aplicables.

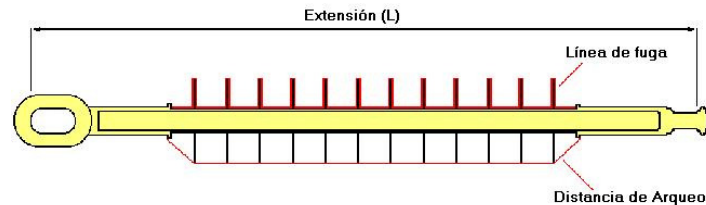
Comúnmente se siguen las siguientes normas que buscan dar procedimientos de prueba, uso y mantenimiento a los aisladores de porcelana:

- ANSI C29.1: *Test Methods for Electrical Power Insulators (Low an Medium Voltage Pin Type).*
- ANSI C29.3: *Wet Process Porcelain Insulators (Spool Type).*
- ANSI C29.4: *Wet Process Porcelain Insulators (Strain Type).*

Estas normas definen clases de aisladores, los que están debidamente reglamentados en cuanto a sus dimensiones, materiales, test de pruebas. Estos últimos son tanto mecánicos como eléctricos, realizados en diversas condiciones ambientales

Conceptos fundamentales al momento de elegir y adquirir aisladores se definen en estas normas, los más relevantes son:

- Distancia de Fuga.  
*Es la suma de las distancias más cortas medidas a lo largo de la superficie del aislador, entre las partes conductoras.*
- Distancia de Arco Seco.  
*Es la distancia más corta en aire al exterior del aislador entre dos electrodos.*



**Figura 8: Distancia de Fuga y Distancia de Arco.**

### **Tipos de Aisladores.**

A continuación se presentan diversos tipos de aisladores con sus respectivas características y especificaciones principales. Estos son ofrecidos por la empresa Kersting, y son de fabricación china. Están orientados principalmente a líneas de distribución y equipos en MT y BT. Por supuesto existen tipos similares para aplicaciones de mayor tensión y mayores solicitudes dieléctricas.

#### *Tipo Carrete:*

- Redes de Distribución en BT, 220-380V.
- Clase ANSI 53-0.
- Distancia Fuga: 43 mm.
- Tensión Arco Seco: 10kV.



#### *Tipo Tensor:*

- Postes de Distribución.
- Clase ANSI 54-0.
- Distancia de Fuga: ---
- Tensión de Arco: 10 kV.



*Tipo Espiga:*

- Redes de Distribución MT, 15kV y 34.5kV .
- Clase ANSI 55-4.  
ANSI 56.3.
- Zona normal.
- Distancia de Fuga: 228.6 mm  
533.4mm.
- Tensión de Arco: 70 kV.  
125 kV.



*Tipo Disco:*

- Postes de Remate en  
Redes de Distribución.
- Clase ANSI 52-1.
- Distancia de Fuga: 178 mm.
- Tensión de Arco: 60 kV.



*Tipo Soporte o Pedestal (Bushing)*

- Banco de Condensadores en MT,  
Desconectadores y bushing de bajadas.
- Clase ANSI TR-205.
- Distancia de Fuga: 394 mm.
- Tensión de Arco: 85 kV.



*Pararayos:*

- Redes Distribución 15kV.
- Tensión nominal: 12 kV.
- Corriente nominal: 10<sup>a</sup>.
- Tensión residual: 57 kV.
- Distancia de fuga: 350 mm.



### *Desconectador*

- Redes de Distribución.
- Tensión máxima: 15kV.
- Corriente nominal: 100A.
- Distancia de fuga: 250 mm.



### **V. Empresas Consultadas:**

- *ICB – Insulator Casa Blanca, [www.porcelain-insulators.cl](http://www.porcelain-insulators.cl)*
- *Kersting, Iluminación y Energía, Distribuidores de Aisladores de Fabricación China.*

### **Bibliografía:**

*William F. Smith, Ciencias e Ingeniería de Materiales, McGraw Hill, 2004, ISBN 84-481-2956-3.*

*Tarbuck, Edward J., Ciencias De La Tierra, 8ª Edición, Prentice Hall, ISBN: 8420549983.*

*Tetsuo Fujimura, The Evolution of Porcelain Insulator Technology in Japan, Chubu University.*

*Norma ANSI C29.1-1988 (R2002), Test Methods for Electrical Power Insulators.*