# MATERIALES CERÁMICOS

**RESUMEN**

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos compuestos por elementos metálicos y no metálicos vinculados químicamente. Pueden ser cristalinos, no cristalinos o una mixtura de ambos.

Poseen una alta dureza y resistencia al calentamiento, pero tienden a la fractura frágil. Se caracterizan principalmente por su bajo peso, alta rigidez y baja tenacidad, alta resistencia al calor y al desgaste, poca fricción y buenas propiedades aislantes.

Los materiales cerámicos son baratos, pero su procesado hasta producto terminado es normalmente lento y laborioso. Además, la mayoría de estos materiales se daña fácilmente por impacto a causa de su baja o nula ductilidad.

**Autor: Paralieu Gastón P-2840/1 – Est. Avanzado de Ing. Industrial**

## Introducción

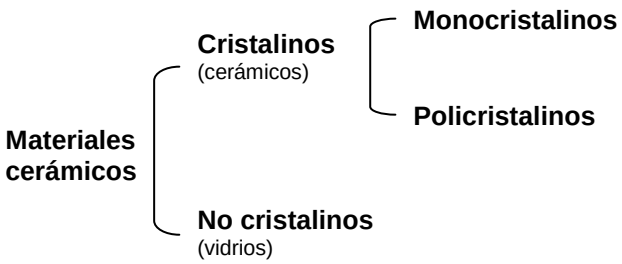
Históricamente, los cerámicos se cuentan entre los materiales más antiguos hechos por el Hombre. Si bien su invención data del Neolítico, el primer pueblo que desarrolló técnicas para elaborar la cerámica fue el Chino, pasando el conocimiento a Japón, la India, Medio Oriente, Egipto, Grecia y finalmente Europa. Estas civilizaciones, en contraposición a las culturas prehistóricas que simplemente dejaban secar las piezas de cerámicas al sol o junto a una fogata, fueron desarrollando métodos de **cocción** en hornos, lo que mejoró las prestaciones del material y sus bondades estéticas.

## Clasificación

### Estructura

Puede ser cristalina, no cristalina, o una mezcla de ambas. Se presentan en las más variadas formas; de estructuras muy simples a las más complejas mezclas de fases. Su abundancia en la naturaleza y las diferencias que presentan en sus propiedades respecto a las de los metales los convierte en materiales sumamente importantes.

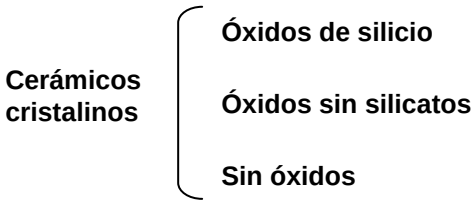
Según su estructura, los cerámicos pueden clasificarse en dos grandes grupos, los cristalinos o cerámicos, y los no cristalinos o vidrios. A su vez, los cristalinos pueden ser monocristalinos o policristalinos. (ver *Cuadro 1*)




**Cuadro 1.** Clasificación de los cerámicos según su estructura.

Los que presentan estructura policristalina o no cristalina pueden a su vez ser monofásicos o polifásicos.

Las cerámicas cristalinas pueden clasificarse en tres grupos. Las **cerámicas de silicato**, cuya unidad estructural fundamental es el $SiO_2$, incluyen por ejemplo a la porcelana y los materiales refractarios. Los **cerámicos de óxido sin silicatos** son compuestos a los que se les agregan impurezas, como el $Al_2O_3$, MgO y BeO. Las **cerámicas sin óxidos**, como el ZnS, SiC y TiC, se utilizan como material para elementos calefactores de horno, así como material abrasivo.




**Cuadro 2.** Cerámicas cristalinas.

**Estructura no cristalina.** Los átomos se acomodan en conjuntos irregulares y aleatorios. Los sólidos no cristalinos con una composición comparable a la de las cerámicas cristalinas se denominan **vidrios**. La mayor parte de los vidrios que se comercializan son silicatos.

### Estructura

Puede ser cristalina, no cristalina, o una mezcla de ambas. Se presentan en las más variadas formas; de estructuras muy simples a las más complejas mezclas de fases. Su abundancia en la naturaleza y las diferencias que presentan en sus propiedades respecto a las de los metales los convierte en materiales sumamente importantes.

Cristales cerámicos

Hay dos características de los iones que componen los materiales cerámicos cristalinos que determinan la estructura cristalina:

- El valor de la carga eléctrica de los iones componentes.
- Los tamaños relativos de los cationes y aniones.

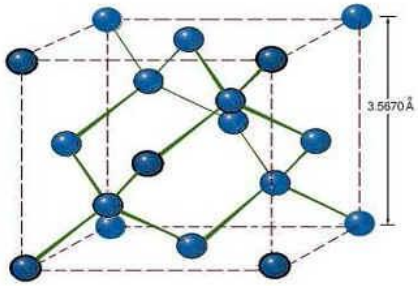
Con respecto a la primera, el cristal debe ser eléctricamente neutro; es decir debe haber igual número de cargas positivas ( de los cationes) que de cargas negativas (de los aniones). La fórmula química de un compuesto indica la proporción que debe haber entre cationes y aniones para que se mantenga la neutralidad.
El segundo aspecto comprende el tamaño de los radios iónicos de los cationes y aniones $R_C$ y $R_A$ . Puesto que los elementos proporcionan electrones al ser ionizados los cationes son generalmente menores que los aniones por lo tanto $R_C/R_A$ es menor que uno. Cada catión de rodeará de tantos aniones vecinos más próximos como le sea posible. Los aniones también se rodearán del máximo número de cationes posibles como vecinos más próximos.
Las estructuras cristalinas se vuelven más estables mientras mayor sea el número de aniones que rodean al catión central.

Carbono

El carbono es un elemento que existe en varias formas polimórficas, así como en estado amorfo. Este grupo de materiales no cae dentro de ninguna de las clases tradicionales en que se clasifican los materiales: metales, cerámicas y polímeros. Sin embargo hemos decidido nombrar estos materiales puesto que el grafito (una de las formas polimórficas) se clasifica a veces como una cerámica; y también porque la estructura cristalina del diamante (otro polimorfo) es similar a la de la blenda ( ZnS), un compuesto cerámico.

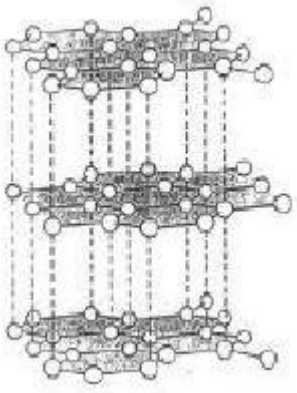
Diamante

El diamante es un polimorfo metaestable de carbono a temperatura ambiente y presión atmosférica. Cada átomo de carbono está unido con otros cuatro átomos de carbono mediante enlaces totalmente covalentes.
Se caracteriza por ser extremadamente duro (el material más duro conocido) y por su poca conductividad eléctrica




Grafito

El grafito es otro polimorfo del carbono cuya estructura cristalina está compuesta por capas de átomos de carbono dispuestos hexagonalmente: en cada capa cada átomo de carbono está unido a tres átomos coplanales por enlaces covalentes; el cuarto electrón de enlace participa en enlaces de tipo fuerzas de van der waals entre las capas. Como consecuencia de estos enlaces interplanares débiles, la separación interplanar es considerable y el deslizamiento entre planos fácil. Sus propiedades: Alta conductividad eléctrica, alta resistencia y buena estabilidad química a temperaturas elevadas.



Estructuras cerámicas de silicatos

Muchos materiales cerámicos contienen estructuras de silicatos con átomos de silicio y oxígenos enlazados entre sí en varias distribuciones. También un número de formaciones naturales de tipo mineral tales como arcillas feldespatos y micas son silicatos; ya que el silicio y el oxígeno son los dos elementos más abundantes encontrados en la corteza terrestre.
Se caracterizan por su bajo precio, disponibilidad y por sus propiedades especiales. Las estructuras de silicato son particularmente importantes para materiales de construcción en ingeniería: vidrios, cemento Portland, ladrillos y aislantes eléctricos.

Imperfecciones en las estructuras cerámicas cristalinas

Defectos atómicos puntuales

En los materiales cristalinos cerámicos los átomos existen como iones cargados. Esto hace que la estructura de defectos debe cumplir las condiciones de electroneutralidad . Por consiguiente los defectos en las cerámicas no ocurren de forma aislada. Un tipo de defecto está formado por una vacante catiónica y3un catión intersticial. Esto se denomina un defecto Frenkel. Puede verse como un catión que abandona su posición normal y se mueve a una posición intersticial manteniendo su contribución de carga positiva, lo que asegura la neutralidad.
Otro tipo de defecto encontrado en materiales AX es un par vacante catiónica- vacante aniónica conocido como defecto Schottky, creado por la eliminación de un catión y un anión desde el interior de un cristal. El hecho de que para cada vacante aniónica exista una vacante catiónica asegura que la neutralidad de la carga del cristal se mantenga.
Estos dos defectos, por otra parte, no alteran las proporciones de aniones y cationes manteniendo la estequiometría en el material.

Impurezas en cerámicas

Los átomos de impurezas pueden formar soluciones sólidas en los materiales cerámicos tanto intersticiales como sustitucionales
En el caso de las intersticiales, los radios iónicos de las impurezas deben ser pequeños en comparación con los del anión. Una impureza sustituirá al átomo disolvente que sea más similar en el comportamiento eléctrico.
Para que en el estado sólido haya una solubilidad apreciable de los átomos de impurezas sustitucionales, los tamaños iónicos y la carga deben ser casi iguales a los de los inoes disolventes. Si una impureza tiene una carga distinta a la del ión al cual sustituye red como los anteriormente descriptos.

Dislocaciones

En algunos materiales cerámicos incluyendo el lif, el zafiro ($Al_2O_3$) y el MgO se observan dislocaciones. Sin embargo estas no se mueven con facilidad debido a un vector de Burguers grande a la presencia de relativamente pocos sistemas de deslizamientos y a la necesidad de romper enlaces iónicos fuertes para después obligar a los iones a deslizarse a los de carga opuesta. Como consecuencia las grietas no se redondean por la deformación del material que se encuentra en la punta de la grieta y su propagación continúa. Eso es lo que hace de los cerámicos, materiales frágiles.

Defectos superficiales

Los límites de grano y las superficies de las partículas son defectos superficiales importantes en los cerámicos. Un cerámico con grano de tamaño fino tiene mayor resistencia que uno de grano más grueso. Los granos más finos ayudan a reducir los esfuerzos que se desarrollan en sus bordes debido a la expansión y a la contracción anisotrópica, Normalmente se produce un tamaño de grano fino utilizando desde el principio materias primas cerámicas de partículas más finas (en el caso de sinterizado).
Las superficies de las partículas que representan planos de uniones covalentes o iónicas rotas y no satisfechas, son reactivas. Distintas moléculas pueden ser absorbidas en la superficie para reducir la energía superficial, alterando su composición, sus propiedades y su conformabilidad.

Porosidad

En un material cerámico los poros pueden estar interconectados o bien, cerrados. La porosidad aparente mide los poros interconectados y determina la permeabilidad (facilidad con la cual pasan gases y otros fluidos a través del cerámico). Se determina pesando el material cerámico seco ($W_D$) después de vuelve a pesar cuando está suspendido en agua ($W_S$) y después de que ha sido retirado el agua (WW)

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{W_w - W_d}{W_w - W_s} \times 100$$

La porosidad real incluye tanto poros interconectados como cerrados

$$\text{Porosidad real} = \frac{\varsigma - B}{\varsigma} \times 100, \quad B = W_d / (W_w - W_s)$$

***B es la densidad en masa y $\varsigma$ es la densidad real del cerámico.***

***Ejemplos de materiales cerámicos***

- **Nitruro de silicio ($Si_3N_4$)**, utilizado como polvo abrasivo.
- **Carburo de silicio (SiC)**, empleado en hornos de microondas, en abrasivos y como material refractario.
- **Óxido de cinc (ZnO)**, semiconductor.
- **Magnetita ($Fe_3O_4$)**, es utilizado en núcleos de transformadores magnéticos y en núcleos de memorias magnéticas.
- **Esteatita**, utilizada como un aislante eléctrico.
- **Ladrillos**, utilizados en construcción.

**PROPIEDADES**

**Propiedades eléctricas de los cerámicos:**

Los materiales cerámicos se usan ampliamente en la industria eléctrica y electrónica.
Principalmente como aislantes (dieléctricos) eléctricos o en capacitores.
Otra aplicación difundida es derivada de las propiedades piezoeléctricas de ciertos tipos de cerámicas.

***Propiedades de los componentes dieléctricos:***

La unión iónica y covalente en materiales cerámicos restringe la movilidad de los iones y de los electrones (los cales se comporten entre dos átomos o son cedidos de un átomo a otro) y esto determina que estos materiales sean buenos aislantes eléctricos
Existen 3 propiedades básicas de los componentes dieléctricos.

- Constante dieléctrica
- Ruptura dieléctrica
- Factores de perdida

***Comportamiento dieléctrico:***

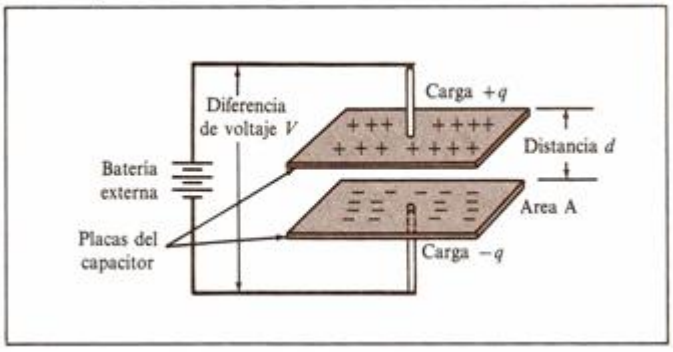
Este tipo de material cerámico presenta una estructura bipolar (entidades de cargas (+) y (-) a nivel atómico o molecular separadas) por lo en presencia de un campo eléctrico estos se orientan y es posible usarlos en capacitores.

**Constante dieléctrica:**

La **constante dieléctrica** de un medio continuo es una propiedad macroscópica.
El efecto de la constante dieléctrica se manifiesta en la capacidad total de un condensador eléctrico o capacitor. Cuando entre los conductores cargados o paredes que lo forman se inserta un material dieléctrico diferente del aire la capacidad de almacenamiento de la carga del condensador aumenta. De hecho la relación entre la capacidad inicial $C_i$ y la final $C_f$ vienen dada por la constante eléctrica:

$$K = \frac{C_f}{C_i} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r = (1 + \chi_e)$$

La alta constante dieléctrica de ciertos tipos de cerámicos permite la miniaturización de capacitores.




$$C = (\varepsilon \,.\, k \,.\, A) / d$$

C: capacidad
ε: Permeabilidad en el vacío (ctte)
k: constante dieléctrica
d: distancia entre placas

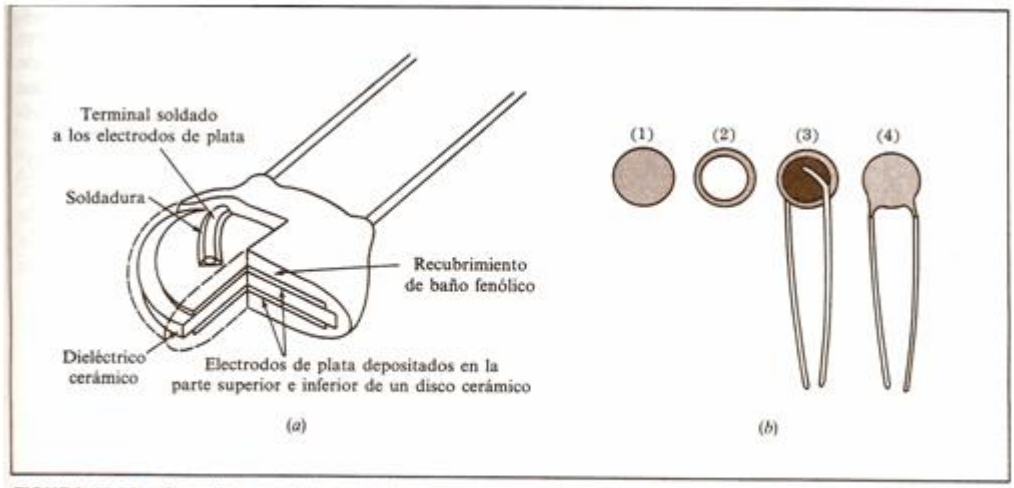



**FIGURA 10.38.** Capacitor cerámico. (*a*) Sección que muestra su construcción. (*Cortesía de Sprague Products Co.*) (*b*) Etapas de manufactura: (1) Después de calentamiento del disco cerámico. (2) Después de aplicar electrodos de plata. (3) Después de soldar los terminales. (4) Después de aplicar una capa fenólica. (*Cortesía de Radio Materials Co.*)

La tabla 10.7 muestra valores de constante dieléctrica de algunos materiales aislantes cerámicos.

**TABLA 10.7.** Propiedades eléctricas de algunos aislantes cerámicos

| Material | Resistividad por volumen, Ω·m | Rigidez dieléctrica | | Constante dieléctrica, κ | | Factor de pérdidas | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | V/mil | kV/mm | 60 Hz | $10^6$ Hz | 60 Hz | $10^6$ Hz |
| Eléctrica porcelana aislantes | $10^{11}$–$10^{13}$ | 55-300 | 2-12 | 6 | ··· | 0,06 | |
| Aislantes de esteatita | $>10^{12}$ | 145-280 | 6-11 | 6 | 6 | 0,008-0,090 | 0,007-0,025 |
| Aislantes de fosterita | $>10^{12}$ | 250 | 9,8 | ··· | 6 | ··· | 0,001-0,002 |
| Aislantes de alúmina | $>10^{12}$ | 250 | 9,8 | ··· | 9 | ··· | 0,0008-0,009 |
| Vidrios soda-cálcico | ··· | ··· | ··· | ··· | 7,2 | ··· | 0,009 |
| Silice fundida | ··· | 8 | ··· | ··· | 3,8 | ··· | 0,00004 |

*Fuente:* Materials Selector, *Mater. Eng.*, diciembre, 1982.

Referencia:

| | |
|---|---|
| K Vacío | 1 |
| K Aire | 1.00059 |

**Rigidez dieléctrica:**

Entendemos por rigidez dieléctrica el valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aisladora y pasa a ser conductor (ruptura eléctrica). También podemos definirla como la máxima tensión que puede soportar un aislante sin perforarse. A esta tensión se la denomina tensión de rotura.
Si el dieléctrico es sometido a una diferencia de voltaje suficientemente alta, el esfuerzo de los electrones y los iones en su intento por pasar a través del dieléctrico puede superar la rigidez dieléctrica ocasionando que el material empiece a fallar y finalmente se produzca el paso de electrones.
La tabla 10.7 muestra valores de rigidez dieléctrica de algunos materiales aislantes cerámicos.

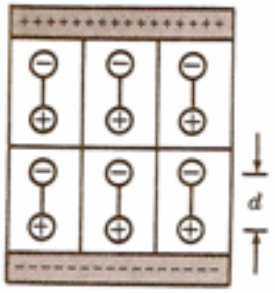
**Factor de pérdida:**

Es una medida de la energía eléctrica perdida (en forma de calor) por un capacitor en un circuito de corriente alterna.
La tabla 10.7 muestra valores de factor de pérdida de algunos materiales aislantes cerámicos.

***Comportamiento piezoeléctrico:***

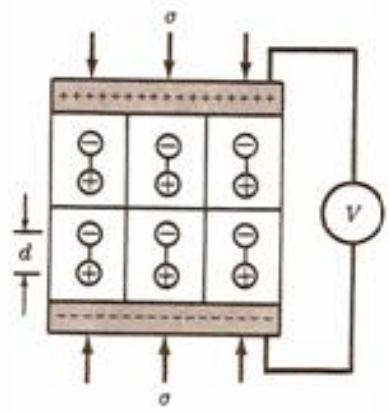
Efecto electromecánico por el cual una fuerza mecánica en un material ferro eléctrico produce una respuesta eléctrica o fuerzas eléctricas una respuesta mecánica.

Algunos pocos materiales cerámicos como el titanato de bario los cuales son cerámicos denominados ferro eléctricos que se caracterizan por ser cerámicos iónicos cristalinos cuyas celdas unidad no poseen centro de simetría y por ende contienen pequeños momentos dipolares que en su sumatoria darán un momento dipolar total.

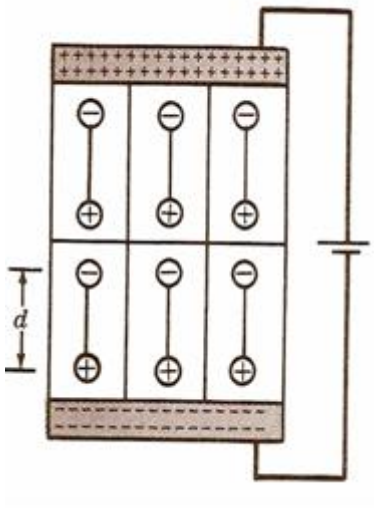



En la figura superior vemos un esquema ilustrativo de dipolos dentro de un material piezoeléctrico.

Veamos primero que si sometemos la pieza a esfuerzos compresivos se reducirá la distancia entre dipolos y por ende el momento bipolar total por unidad de volumen del material, lo cual modifica la densidad de carga en las caras de la muestra y así cambia la ddp.




En segundo lugar veamos que si aplicamos un campo eléctrico la densidad de carga en los extremos de la muestra cambia lo que implica variación en las dimensiones de la muestra




***Semiconductores cerámicos:***

Mediante soluciones sólidas de óxidos metálicos sintetizados de Mn, Ni, Fe, Co y Cu con alta diferencia de resistividad se pueden crear semiconductores con una conductividad intermedia por combinación de óxidos metálicos.

EJ: El compuesto cerámico magnetita $Fe_3O_4$ tiene una resistividad de $10^{-5}$ Ω.m

La mayoría de los óxidos metálicos de transición tienen una resistividad de $10^8$ Ω.m

Si a la magnetita $Fe_3O_4$ de alta conductividad le aditamos cantidades crecientes de $MgCr_2O_4$ de alta resistividad lograremos reducir gradualmente la conductividad de la solución sólida.

Aplicaciones:
Circuitos integrados, transistores, microprocesadores

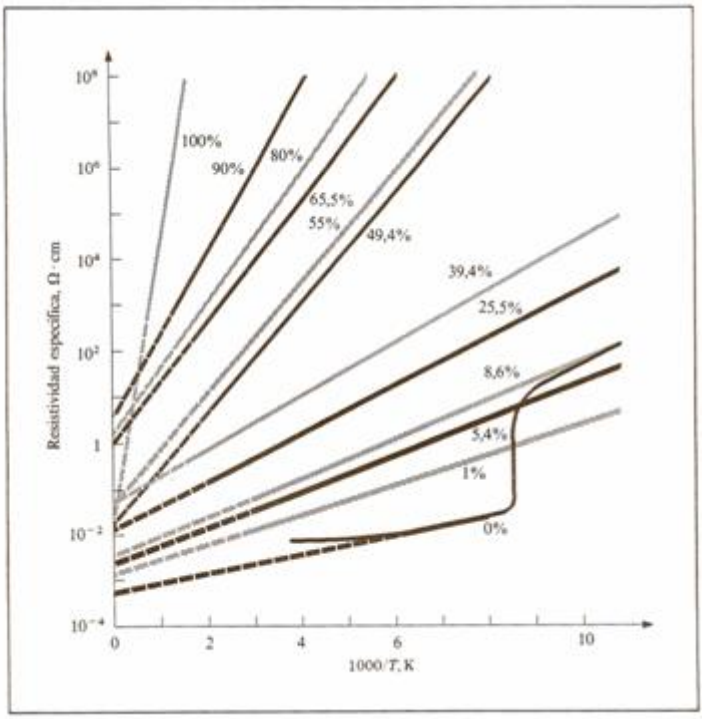



**FIGURA 10.39.** Resistividad específica de una solución sólida de $Fe_3O_4$ y $MgCr_2O_4$. El porcentaje en moles de $MgCr_2O_4$ viene indicado por las curvas. [*Según E. J. Verwey, P. W. Haagman, y F. C. Romeijn, J. Chem. Phys. 15:18(1947).*]

**Propiedades térmicas de los cerámicos:**

En general la mayoría de los materiales cerámicos tiene baja conductividad térmica debido a sus fuertes enlaces iónicos covalentes y son buenos aislantes térmicos. La figura 10.49 compara conductividades térmicas de distintos materiales cerámicos en función de la temperatura. Debido a la resistencia al calentamiento son usados como refractarios.

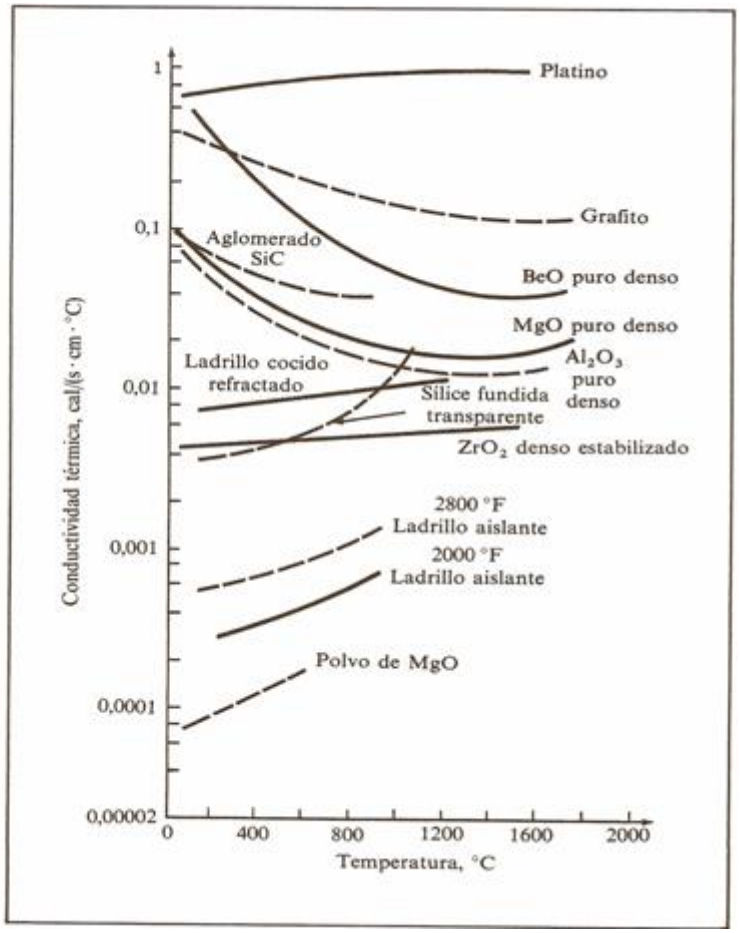



**FIGURA 10.49.** Conductividad térmica (escala logarítmica) de los materiales cerámicos en un ancho rango de temperaturas. (*De W. D. Kingery, H. K. Bowen, y D. R. Uhlmann, «Introduction to Ceramics», 2.ª ed., Wiley, 1976, p. 643.*)

***Conductividad térmica:***

La conducción térmica es un fenómeno por el cual el calor se transporte de una región de alta temperatura del material a otra de baja temperatura. La conductividad térmica caracteriza la capacidad de un material de transferir calor
Los materiales que no poseen electrones libres son aislantes térmicos y solo existe transporte de calor por vibraciones de la red.
El vidrio y otras cerámicas amorfas tienen conductividades menores que las cerámicas cristalinas por su estructura atómica altamente desordenada e irregular.

***Esfuerzos térmicos ó tensiones:***

Las tensiones térmicas son tensiones inducidas en un cuerpo como resultado de
Cambios en la Temperatura.
Tensiones resultantes de la expansión y contracción térmicas confinadas.
Lo cual puede producir fracturas y agrietamiento, lo cual se da por lo general en los procesos de secado.

***Choque térmico de un material frágil:***

El enfriamiento rápido de un material introduce en las tensiones superficiales de reacción, contribuyendo a la formación de grietas y su propagación a partir de defectos superficiales y pudiendo producir rotura. La capacidad de un material de soportar esta clase de falla se llama resistencia al choque térmico. Para un cuerpo cerámico que es rápidamente enfriado, la resistencia al choque térmico depende no solo de la magnitud del cambio de la Temperatura sino también de las propiedades mecánicas y térmicas del material. La resistencia al choque térmico es mejor para cerámicos que tienen alta resistencia a la fractura f y alta conductividad térmica así como bajo modulo de elasticidad y bajo coeficiente de expansión térmica.

**Porosidad:**

Los poros cumplen una función importante, al permitir soportar shocks térmicos (quebraduras como resultado del rápido cambio de temperatura). Cuando la porosidad es más baja se produce una pérdida de la capacidad aislante y de la resistencia al shock.

***Punto de fusión:***

En general, los cerámicos tienen alto punto de fusión, debido a sus uniones iónico – covalentes.

**Propiedades mecánicas de los cerámicos:**

Considerando a los cerámicos como una clase de material, podemos decir que estos son relativamente frágiles, en estos la resistencia a la tracción (o tensión) que soportan los materiales cerámicos varía enormemente pero en ningún caso soporta los 172 Mpa
Mientras que la resistencia a la compresión es de 5 a 10 veces superior.
Por lo general los materiales cerámicos son duros y tienen baja resistencia al impacto debido a sus uniones iónico – covalentes.

**Mecanismos para la deformación en cerámicos:**

**Con enlaces covalentes** entre capas de átomos: en esta situación cuando el material es sometido a una tracción lo suficientemente alta se separan las uniones de pares de electrones sin que se vuelvan a formar luego y se produce una fractura quebradiza.
Es por eso que los cerámicos enlazados covalententemente son frágiles tango para estructuras monocristalinas como policristalinas.

**Con enlace Iónico:**

- *Monocristalinos:* muestran deformación plástica bajo fuerzas compresoras a temperatura ambiente. Ej.: oxido de magnesio y cloruro de sodio (sin embargo los cerámicos policristalinos son los mas usados en la industria); en estos los deslizamientos se producen sobre las filas. de planos {110} donde los iones son de igual carga.
- *Policristalinos:* En regiones donde predominan los enlaces iónicos, la rotura se produce por repulsión de iones de igual carga al querer producir deslizamiento sobre la flia. de planos {100}.

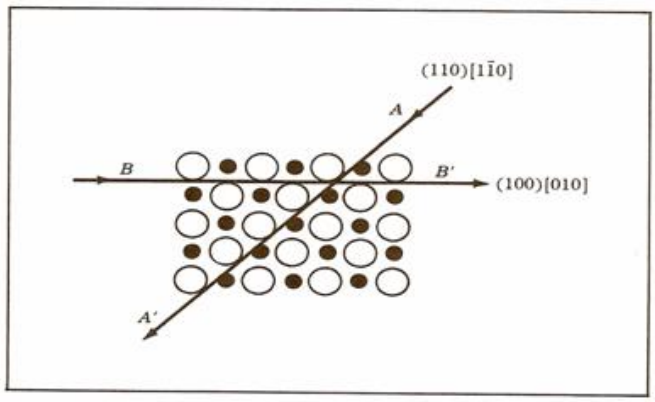
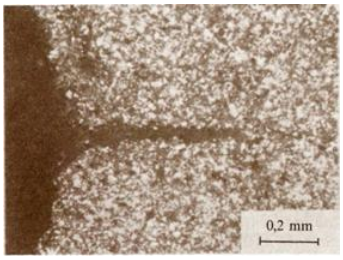



**FIGURA 10.44.** Vista superior de la estructura de un cristal de NaCl indicando (*a*) deslizamiento en el plano (110) y en la dirección [1$\bar{1}$0] (línea *AA'*) y (*b*) deslizamiento en el plano (100) y en la dirección [010] (línea *BB'*).

***Factores que afectan la resistencia de los materiales cerámicos:***

La falla mecánica en materiales cerámicos se da principalmente por defectos estructurales. En cerámicos policristalinos las principales causa de fractura de deben a la presencia de grietas superficiales, poros, inclusiones y granos de gran tamaño.

En los poros se concentran grandes esfuerzos y cuanto el esfuerzo alcance cierto valor crítico se formara una grieta y se propagara hasta que ocurre la fractura (considerando que la tenacidad de estos materiales es baja por lo que no se oponen a las propagaciones de fisuras).



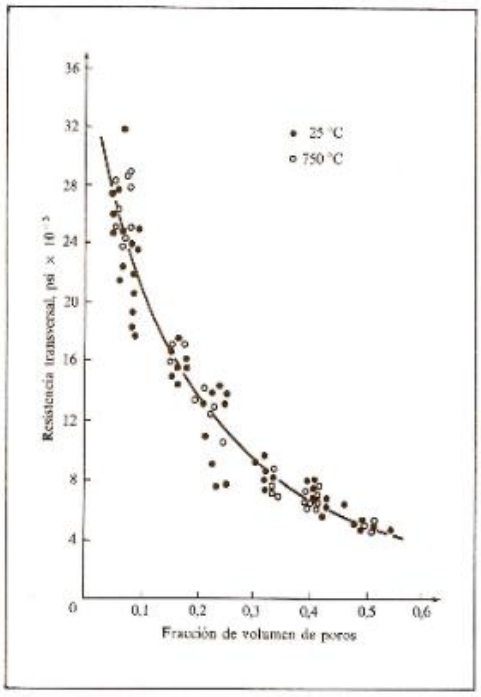
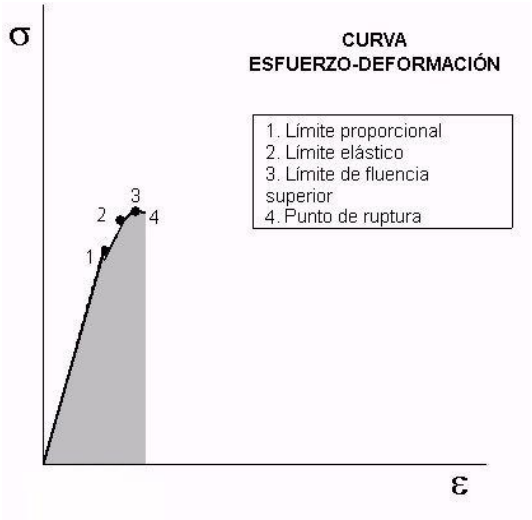




**FIGURA 10.45.** Efecto de la porosidad sobre la resistencia transversal de la alúmina pura. [*Según R. L. Coble y W. D. Kingery, J Am. Ceram. Soc., 39:377(1956).*]

***Tenacidad:***

Los materiales cerámicos debido a su combinación de enlaces iónico – covalente tienen baja tenacidad.

La tenacidad es la resistencia a la ruptura y a las deformaciones, y está representada por el área bajo la curva de tensión-deformación. Al ser ésta pequeña (por la falta de una etapa de deformación plástica), la energía que pueden absorber los cerámicos antes de la ruptura es poca.




La tenacidad como área bajo la curva tensión-deformación.

A pesar de esto la tenacidad puede aumentarse mediante procesos como la presión en caliente de cerámicos con aditivos y reacciones a de aglutinación.

***Dureza:***

La gran dureza de los cerámicos se debe a sus fuertes enlaces covalentes y es una de sus principales características. A razón de esto suelen ser usados como abrasivos (ej. carburo de silicio, SiC) para pulir otros materiales.

***Rotura por fatiga en cerámicos:***

Como en los cerámicos hay ausencia de plasticidad al ser sometidos a esfuerzos cíclicos, la fractura por fatiga en materiales cerámicos es poco común.
Pero existen ciertos casos comprobados como el de alumina policristalina que a temperatura ambiente después de 79.000 compresiones cíclicas presento fisura por fatiga.

**Cerámicos tradicionales y cerámicos de ingeniería**

Otra clasificación de los cerámicos los divide en cerámicos tradicionales y de ingeniería.

**Cerámicos tradicionales.** Los cerámicos tradicionales son silicoaluminados derivados de materias primas minerales. Se constituyen de tres componentes básicos: la arcilla ($SiO_2Al_2O_3OH$), sílice o silex ($SiO_2$, arena) y feldespato ($SiAlO_2K$ o $SiAlO_2Na$).

La **arcilla**, a su vez, está compuesta principalmente por silicatos de aluminio hidratados con pequeñas cantidades de otros óxidos. Antes que el material endurezca por el fuego, las arcillas se pueden trabajar, y constituyen el cuerpo principal del material. Por su lado, el **sílice** ($SiO_2$, silex, arena o cuarzo) funde a altas temperaturas y constituye el componente refractario de los cerámicos tradicionales. El **feldespato potásico** funde a baja temperatura, transformándose en vidrio, formando una fase líquida que une los componentes refractarios y facilita la sinterización.

Las **aplicaciones estructurales** de la arcilla, como los ladrillos para la construcción, las tuberías de desagüe, las tejas y las losetas para pisos, están fabricadas a partir de “arcillas brutas” o naturales, las cuales contienen los tres componentes básicos.

**Cerámicos de ingeniería.** Las cerámicas técnicas o de ingeniería son fabricados con compuestos sintéticos puros o casi puros; principalmente óxidos, carburos, nitruros. Algunas de las más importantes cerámicas de ingeniería son: alúmina ($Al_2O_3$) en industrias microelectrónicas, nitruro de silicio ($Si_3N_4$) se usa para herramientas de corte como el torno, carburo de silicio (SiC) se utiliza como abrasivos y circonia ($ZrO_2$)

combinados con algunos otros óxidos refractarios, para recubrimiento de las superaleaciones de los álabes de las turbinas.

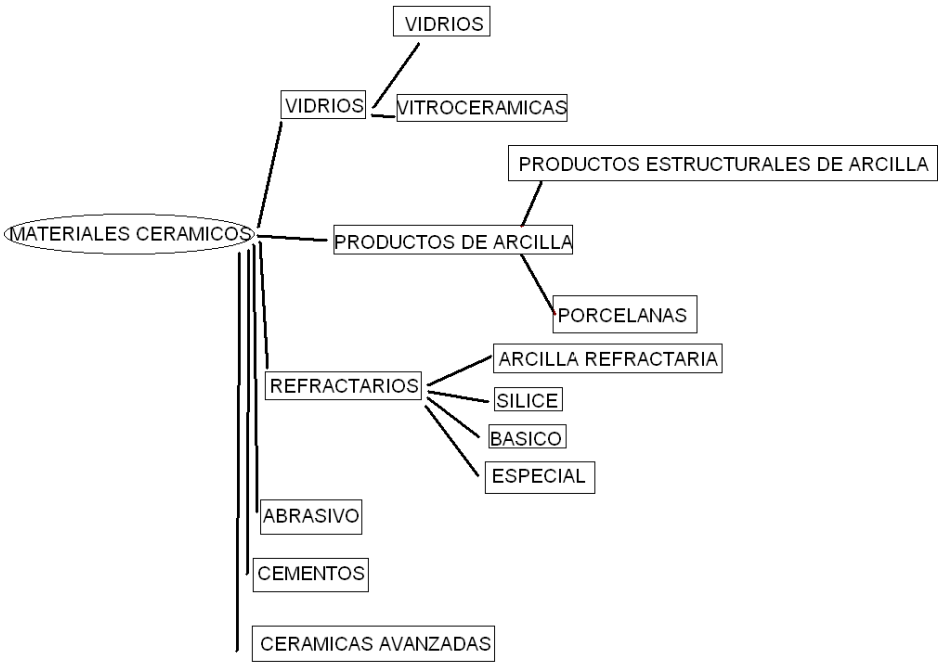
**Procesamiento de cerámicos tradicionales**

Las etapas básicas para el procesado de cerámicos son tres:

1. **Preparación del material**
2. **Moldeado** (en seco o en húmedo)
3. **Tratamiento térmico** por secado y **horneado** por calentamiento de la pieza de cerámica.

**Conformado, procesamiento de materiales cerámicos**

Los materiales cerámicos tiene dos propiedades que son determinantes de sus métodos de conformado y procesado. Poseen un alto punto de fusión y casi nula deformación térmica hasta a altas temperaturas. Estos factores hacen que la fusión de los cerámicos para conformarlos y trabajarlos como líquidos sea inviable. Es por ello que se le da forma al polvo o mezcla de polvo, agua y aditivos sin previa cocción y luego se produce la liga cerámica por calentamiento.
El esquema de la figura muestra los distintos tipos de materiales cerámicos:




Las materias primas de cada producto varían de acuerdo a las propiedades requeridas por la pieza terminada. En las cerámicas tradicionales, las que se emplean con mayor frecuencia son los **barros** o **arcillas**.

**Productos de la arcilla**

Las arcillas contienen muchas fases, pero la más importante es la arcilla mineral, como la caolinita, que le confiere la plasticidad. La cantidad y tipo de minerales en una arcilla varían considerablemente; sin embargo, las características comunes de todos los materiales arcillosos son una estructura laminar y la capacidad de absorber agua en la superficie y entre esas placas.

Muchos de los procesos hoy en día se producen a partir de estas materias primas, las cuales primero son sometidas por una operación de molienda para reducir su tamaño de partícula mediante un molino de bolas. El polvo obtenido tiene una buena plasticidad y su humedad varía según el método de conformado a usar, pero su resistencia es baja debido a que el conformado se hace en verde. También se utilizan sílice y feldespatos

(usados como fundentes); estos últimos para formar una fase vítrea en las pastas, a fin de promover la vitrificación y translucidez.

La arcilla es un ingrediente barato que se encuentra en abundancia y son fáciles de conformar se clasifica en **productos estructurales de arcilla** (ladrillos, baldosas, tuberías) y las **porcelas** (alfarería, sanitarios y vajillas). La mezcla de los ingredientes con agua es una práctica común. El agua hace que la arcilla sea maleable, y en consecuencia, fácil de trabajar en ese estado luego para retirar la humedad es después cocida a temperaturas elevadas y además conferirles buena resistencia mecánica.
Las arcillas son alumiosilicatos formadas por aluminia y sílice que contienen agua enlazada químicamente,
Los minerales de arcilla desempeñan un papel fundamental en las piezas cerámicas, estos cuando se añade agua, se hacen muy plásticos, (propiedad que se denomina hidroplasticidad) las moléculas de agua del liquido encajan entre las capas formando una película delgada alrededor de las partículas de arcilla permitiéndoles moverse libremente una respecto de las otras, lo cual resulta una mezcla de arcilla-agua

**Técnicas de conformado**

Existen diversas técnicas, y la que se elija depende del material y de la forma, el tamaño y las propiedades que se deseen para el componente terminado. Las principales clasificaciones de las técnicas de conformado son en seco y en húmedo.

**Moldeos en húmedo**

**Moldeo en barbotina o colado.** En un molde de escayola (yeso) se vierte una mezcla de arcilla y agua llamada barbotina; el molde absorbe el agua de la pasta, que forma una capa delgada en su cara interna. Cuando el depósito de arcilla es lo suficientemente grueso como para formar las paredes del recipiente, se vacía el resto de la barbotina, manteniendo la pieza húmeda en el interior del molde hasta que se seque y contraiga lo suficiente para poder extraerla del mismo. Las piezas pueden alcanzar un 9% de humedad, necesitando un **secado previo** a la cocción. El molde se construye de forma que sea desmontable. Con este proceso se fabrican los sanitarios.

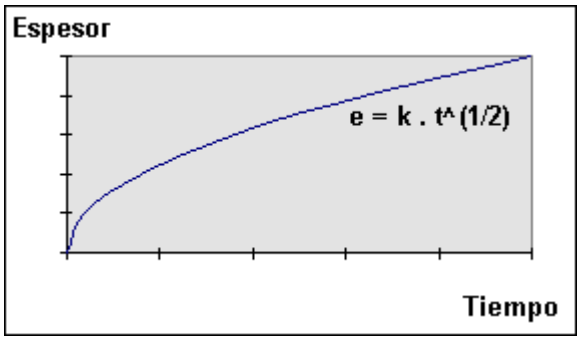



**Figura 4.** Tiempo que permanece la barbotina en el molde, según espesor de la pieza.

Como se ve en la *Figura 4*, el espesor es función del tiempo en que se deja la barbotina en el molde de yeso.

En la *Figura 5* se observa el proceso para una pieza maciza **(a)** y otra hueca **(b)**.

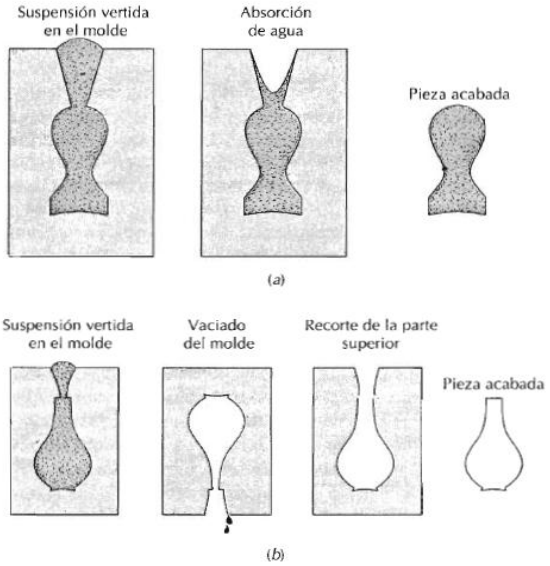



**Figura 5.** Proceso de moldeo en barbotina para piezas macizas y huecas.

**Moldeo por presión.** Se utiliza una pasta líquida a presión para aumentar la velocidad de formación de las piezas. No se utilizan moldes de escayola, ya que carecen de la resistencia y estabilidad necesarias a estas temperaturas y presiones. Las piezas suelen salir con aproximadamente 7% de humedad, por lo que es fundamental el secado de las mismas previa a la cocción. Mediante este proceso no es posible la obtención de piezas de gran tamaño debido a los alabeos que se producen en la pieza húmeda por acción de la gravedad. Un ejemplo que utiliza esta técnica es la vajilla.

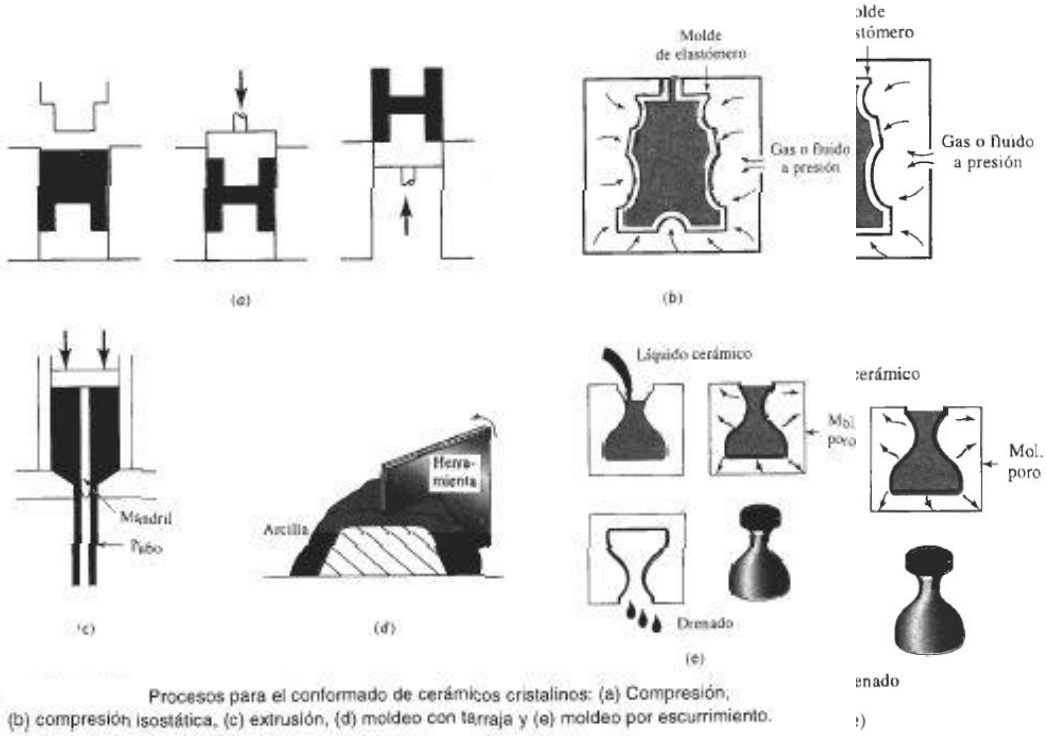
**Extrusión.** Una máquina de extrusión fuerza una masa plástica bastante rígida a través de una boquilla para formar una barra de **sección constante** que puede recortarse en tramos. La arcilla se comprime en el cilindro, por medio de un pistón. Los tubos, tejas, ladrillos y algunos aislantes eléctricos se fabrican por extrusión.

**Moldeos en seco**

**Prensado en seco.** Consiste en compactar polvos secos o ligeramente húmedos a una presión lo suficientemente alta como para formar un artículo relativamente denso y resistente que se pueda manejar. La pasta líquida se seca por **atomización**. La mezcla se da forma a alta presión en una matriz de acero.

En general se emplean dos tipos de **prensa**, la hidráulica y la mecánica. Es importante que la pieza se prense, de manera que adquiera una densidad lo más homogénea posible, de lo contrario se corre el peligro de que se alabe o que se contraiga irregularmente al cocerla. Cuanto mejor fluya la mezcla durante el prensado, más fácil será conseguir una densidad uniforme. El **prensado por ambos extremos** confiere mayor homogeneidad que la que se conseguiría si solo se actuara por arriba. Con la **lubricación de las paredes** se acaba de perfeccionar la operación.

Este método se usa con frecuencia para fabricar materiales refractarios, componentes cerámicos electrónicos y algunas baldosas, las cuales actualmente se pueden fabricar con mayores tamaños.




Procesos para el conformado de cerámicos cristalinos: (a) Compresión, (b) compresión isostática, (c) extrusión, (d) moldeo con tarraja y (e) moldeo por escurrimiento.

**Acabado**

Luego del moldeo, se le da un acabado a la pieza, que, dependiendo de cada caso, constará de recorte y desbarbado, eliminación de aletas, costuras y sobrantes (ya sea de forma automática o manual), acabado superficial, acabado en seco (con papel de lija o cepillo) o acabado en húmedo (con esponja o pincel suave).

**Secado y cocido**

Una pieza cerámica que ha sido conformada hidroplásticamente o por moldeo en barbotina retiene mucha porosidad, y su resistencia es insuficiente para la mayoría de las aplicaciones prácticas. Además, puede contener aún algo del líquido (agua, por ejemplo) añadido para ayudar a la operación de conformado. Este líquido es eliminado en un proceso de secado; la densidad y la resistencia aumentan como resultado del tratamiento a alta temperatura o por el proceso de cocción. Las técnicas de secado y cocción son críticas, ya que una contracción no uniforme durante estas operaciones puede originar tensiones que introduzcan muchos defectos, como grietas o distorsiones, que hacen que la pieza se vuelva inútil.

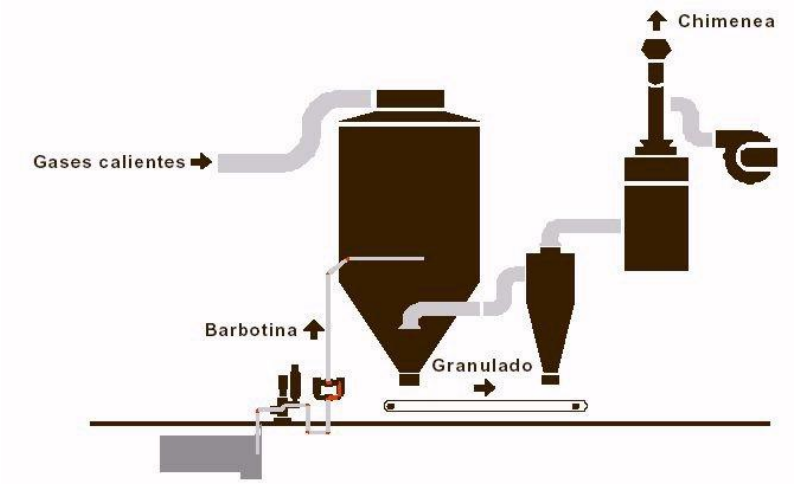
**Secado**

Durante el secado, el control de la velocidad de eliminación de agua es crítico. A medida que un cuerpo cerámico de arcilla se seca, también experimenta contracción. En las primeras etapas de secado, las partículas de arcilla están rodeadas por una película muy fina de agua. A medida que el secado progresa y se elimina agua, la distancia entre partículas disminuye, lo cual se pone de manifiesto en forma de una contracción. El secado en la parte interna de un cuerpo se realiza por difusión de moléculas de agua hasta la superficie, donde ocurre la evaporación. Si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de difusión, la superficie se secará, y por lo tanto se encogerá más rápidamente que en el interior, con una alta probabilidad de formación de los defectos antes mencionados. La velocidad de evaporación superficial debe ser, como máximo, igual a la velocidad de difusión del agua, y puede ser controlada mediante la temperatura, humedad y velocidad del flujo de aire.

Otros factores también influyen en la contracción. Uno de ellos es el espesor del cuerpo; la contracción no uniforme y la formación de defectos son más pronunciados en las piezas de gran espesor que en las delgadas. El contenido de agua del cuerpo conformado también es crítico: cuanto mayor sea, mayor resultará la contracción, y por eso se busca mantenerlo tan bajo como sea posible. El tamaño de las partículas de arcilla también influye en la contracción: ésta aumenta cuanto menor es el tamaño de partícula. Para minimizar este

efecto, el tamaño de las partículas puede aumentarse, o bien se pueden adicionar materiales no plásticos con partículas relativamente grandes.

**Secado por atomización.** Una boquilla atomizadora en la parte superior de una gran cámara divide la pasta líquida en pequeñísimas gotas que caen a través de gases calentados, de forma que cuando llegan al fondo de la cámara lo hacen en forma de pequeñas esferas, a menudo huecas. Dichas esferas son barridas por un rascador giratorio hacia un transportador.




Esquema del proceso de secado por atomización

**Secado de cámara.** La cerámica se coloca en una cámara y el ciclo se completa sin movimiento de la misma. Unos ventiladores de poca velocidad impulsan el aire a través de serpentines de vapor, que luego llega a las piezas mediante aletas graduables.

**Secadores continuos.** Las piezas de cerámica avanzan sobre carretillas o bandas transportadoras, dispuestas en línea recta o en capas, y van siendo sometidas a una secuencia de condiciones definidas.

**Cocción.**

La cocción de los productos cerámicos es una de las etapas más importantes del proceso de fabricación, ya que de ella dependen gran parte de las características del producto cerámico: resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia a los agentes químicos, facilidad de limpieza, resistencia al fuego, etcétera. Las variables fundamentales a considerar en la etapa de cocción son el **ciclo térmico** (temperatura-tiempo, ver Figura 8), y la **atmósfera del horno**, que deben adaptarse a cada composición y tecnología de fabricación, dependiendo del producto cerámico que se desee obtener.

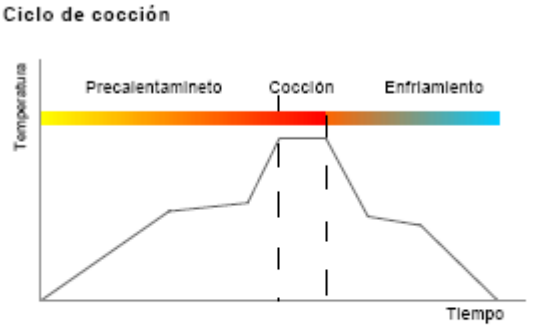



**Figura 8.** Ciclo térmico de cocción.

La operación de cocción consiste en someter a las piezas a un **ciclo térmico**, durante el cual tienen lugar una serie de reacciones en la pieza que provocan cambios en su microestructura y les confieren las propiedades finales deseadas. A medida que la temperatura va aumentando, se van quemando los distintos materiales que componen la cerámica. Entre 300 y 400 $^0$C se quema la materia orgánica que es la que permite mantener la forma como fue moldeada. A los 700 $^0$C se queman los carbonatos produciéndose la liga de la cerámica (cohesión). A los 800 $^0$C se produce la reacción entre las materias primas (arcilla, feldespato, etc.). El quemado es hecho a una temperatura por debajo del punto de derretimiento de la cerámica.

Siempre queda alguna porosidad, pero la real ventaja de este método es que la hornada puede ser producida de cualquier modo imaginable, e incluso puede ser sinterizado. La temperatura máxima de cocción depende del producto deseado; por ejemplo, para la porcelana, que necesita ser de gran calidad con poca porosidad, se eleva la temperatura a 1370 $^0$C. Para la loza sanitaria, que no precisa tanta calidad, se lleva a 1270 $^0$C.

**Cocción rápida.** La cocción rápida de las baldosas cerámicas, actualmente predominante, se realiza en hornos monoestrato de rodillos, los que han permitido reducir extraordinariamente la duración de los ciclos de cocción hasta tiempos inferiores a los 40 minutos, debido a la mejora de los coeficientes de transmisión de calor de las piezas, y a la uniformidad y flexibilidad de los mismos.

En los hornos monoestrato, las piezas se mueven por encima de los rodillos, y el calor necesario para su cocción es aportado por quemadores gas natural-aire, situados en las paredes del horno. Los mecanismos principales de transmisión de calor presentes durante este proceso son la convección y la radiación.

**Procesamiento y aplicación de cerámicos avanzados**

Los cerámicos estructurales avanzados están diseñados para optimizar las propiedades mecánicas a temperaturas elevadas. A fin de alcanzar estas propiedades, se requiere, en comparación con la cerámica tradicional, un control excepcional de la pureza, del procesamiento y de la microestructura. Se utilizan técnicas especiales para conformar estos materiales en productos útiles

**Compresión isostática**

Muchos de los cerámicos más avanzados empiezan en forma de polvo, se mezclan con un lubricante para mejorar su composición, y se prensan para darles forma, la cual, una vez comprimida, se sintetiza para que se desarrolle la micro estructura y propiedades requeridas.
En algunos casos, particularmente en cerámicos avanzados, el conformado por compactación de polvos se efectúa a altas temperaturas, mediante prensas calientes o por compresión isostática en caliente. En este proceso los polvos se llevan en recipientes metálicos o de vidrio; entonces se calientan y compactan simultáneamente en un recipiente de gas inerte a presión. Esto permite utilizar menos lubricantes y disminuye la porosidad, manteniendo propiedades mecánicas deseables.
La humedad remante en la pieza y la porosidad son muy bajas, por lo que se pueden conformar piezas de mayor tamaños sin las complicaciones de alabeos que se obtendrían en el método de moldeo en barbotina o colado. Ejemplos, piezas para motor, turbinas, refractarios porcelanatos y piezas relativamente grandes y simples.

**Sinterizado:** transformación de un producto poroso en compacto
En los casos que no se desea la vitrificación en vez de ello se consigue la resistencia deseada mediante la difusión.
Durante el sinterizado, primero los iones se difunden a lo largo de los bordes y superficies de grano, hacia los puntos de contacto entre partículas, generando puentes y conexiones entre granos individuales (figura 14-36).

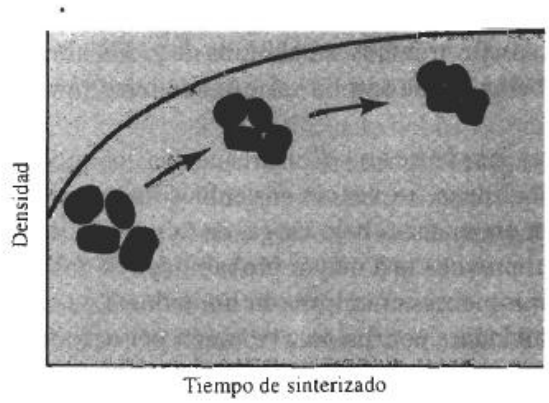



**FIGURA 14-36** Durante el sinterizado, la difusión produce puentes entre las partículas y finalmente hace que los poros se cierren.

Una difusión adicional de los bordes de grano reduce los poros, incrementando la densidad y, al mismo tiempo, los poros se hacen más redondos. Partículas inicialmente más finas y temperaturas más altas aceleran la velocidad de reducción de poros.

Incluso después de largos tiempos de sinterizado todavía podría quedar porosidad en la pieza cerámica y la probabilidad de falla puede ser muy alta. Es posible agregar aditivos a las materias primas para facilitar el desarrollo de una máxima densidad. Sin embargo estos aditivos del sinterizado típicamente realizan lo anterior introduciendo una fase vitrea de bajo punto de fusión. Aunque se consigue minimizar la porosidad, otras propiedades, como la resistencia a la temofluencia, se deterioran.

**Unión por reacción**

Algunos materiales cerámicos, como el Si3N4, se producen mediante unión por reacción. El silicio se conforma y a continuación se le hace reaccionar con nitrógeno para formar el nitruro. La unión por reacción, que se puede efectuar a temperaturas más bajas proporciona un mejor control dimensional, en comparación con la compresión en caliente. Sin embargo, se obtienen densidades y propiedades mecánicas menores.

**Unión y ensamble de piezas cerámicas**
Cuando dos componentes cerámicos se ponen en contacto bajo carga, en la superficie frágil se crean concentraciones de esfuerzos, lo cual provoca una mayor probabilidad de falla.
Además, los métodos para unir piezas cerámicas son limitados. Los cerámicos frágiles no se pueden unir por procesos de soldadura por fusión o de unión por deformación. A bajas temperaturas, se pueden conseguir uniones adhesivas utilizando materiales poliméricos; a temperaturas superiores se pueden utilizar cementos cerámicos. La unión por difusión se utiliza para unir cerámicos entre sí con metales.

**Refractarios**
Los materiales refractarios deben soportar alta temperatura sin corroerse o debilitarse por el entorno y cuenta además con la capacidad de producir aislamiento térmico
Los refractarios se dividen en tres grupos, ácido, básico y neutro, con base en su comportamiento químico

**Refractarios ácidos** Los refractarios ácidos comunes incluyen las arcillas de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla Cuando al sílice se le agrega una pequeña cantidad de alúmina, el refractario contiene un microconstituyente eutéctico con punto de fusión muy bajo y no es adecuado para aplicaciones refractarias por encima de los 1600°C, temperatura que frecuentemente se requiere para fabricar aceros.

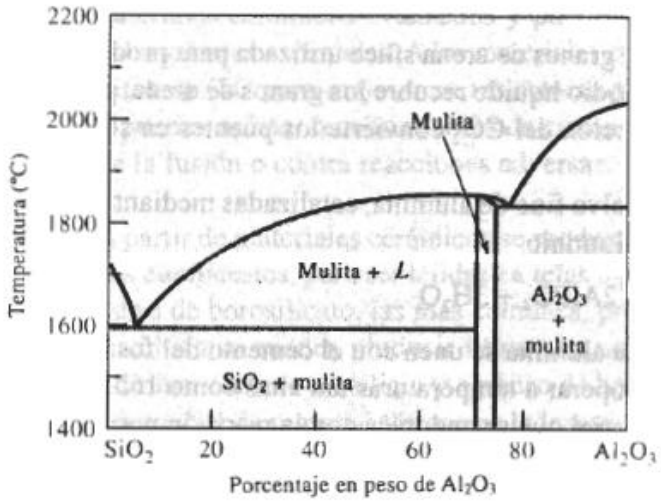



**FIGURA 14-38** Diagrama de fases $SiO_2$-$Al_2O_3$, que es la base de los refractarios de silicatos de alúmina.

Sin embargo, cuando se le agregan mayores cantidades de alúmina, la microestructura adquiere una alta temperatura de fusión. Estos refractarios de arcilla por lo general son relativamente débiles, pero poco costosos.

**Refractarios básicos** Varios refractarios se basan en el MgO (magnesia). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad y buena resistencia al ataque por los entornos que a menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero. Los refractario básicos son más costosos que los refractarios ácidos.

**Refractarios neutros** Estos refractarios pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que una ataque al otro.

**Refractarios especiales** El carbono, o grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible. Otros materiales refractarios incluyen diversidad de nitruros, carburos y boruros. La mayor parte de los carburos, el TiC y el ZrC no resisten bien la oxidación y sus aplicaciones a alta temperatura son más adecuadas para situaciones de reducción. Sin embargo, el carburo de silicio es una excepción; cuando se oxida el SiC a alta temperatura, se forma en la superficie una capa delgada de Si02, protegiéndolos contra oxidación adicional hasta aproximadamente los 1500°C. Los nitruros y los boruros también tienen temperaturas de fusión altas y son menos susceptibles a la oxidación. Algunos de los óxidos y los nitruros son candidatos para uso en turborreactores.

**TABLA 14-5** Composiciones de refractarios típicos (porcentaje en peso)

| Refractario | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | MgO | $Fe_2O_3$ | $Cr_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ácidos** | | | | | |
| Sílice | 95-97 | | | | |
| Ladrillo refractario de alta resistencia | 51-53 | 43-44 | | | |
| Ladrillo refractario de alta alúmina | 10-45 | 50-80 | | | |
| **Básicos** | | | | | |
| Magnesita | | | 83-93 | 2-7 | |
| Olivina | 43 | | 57 | | |
| **Neutros** | | | | | |
| Cromita | 3-13 | 12-30 | 10-20 | 12-25 | 30-50 |
| Cromita-magnesita | 2-8 | 20-24 | 30-39 | 9-12 | 30-50 |

De *Ceramic Data Book*, Cahners Publishing Co. 1982.

**Cementos**

Además de su uso en la producción de materiales para la construcción, en aparatos domésticos, en materiales estructurales y refractarios, los materiales cerámicos encuentran toda una infinidad de aplicaciones, incluyendo las siguientes.

En un proceso conocido como cementación, las materias primas cerámicas se unen utilizando un aglutinante que no requiere horneado o sinterizado. Una reacción química convierte una resina líquida en un sólido que une las partículas.

Se clasifican como cementos inorgánicos a varios materiales cerámicos familiares: Cemento, yeso y caliza, los cuales al mezclares con agua forman una pasta que  al fraguar endurecen

La reacción de cementación más común e importante ocurre en el cemento Portland, utilizado para producir el concreto cuyas propiedades incluidas el tiempo de fraguado y la resistencia final depende en gran medida de su composición.
Las reacciones hidrostáticas empiezan justo cuando se añade agua. Primero se pone de manifiesto como fraguado (aumento de la rigidez de la pasta). El endurecimiento de la pasta tiene lugar como resultado de la hidratación, un proceso relativamente lento que puede continuar por varios años. El cemento no se endurece por secado, sino por hidratación, en cuyo proceso participa una reacción de enlaces químicos.

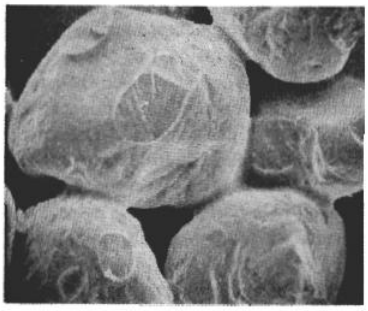


**FIGURA 14-39** Fotografía de granos de arena sílice aglutinados con silicato de sodio mediante el mecanismo de cementación (× 60).

**Abrasivos**

Son utilizados para desgastar, desbastar o cortar a otros materiales, los cuales son necesariamente más blandos. Por consiguiente, la principal característica de este grupo de materiales es su dureza o resistencia al desgaste y alto grado de tenacidad para que las partículas abrasivas no se fracturen fácilmente.

Las cerámicas abrasivas más comunes son el carburo de silicio, el carburo de tungsteno, el oxido de aluminio y la arena de sílice.

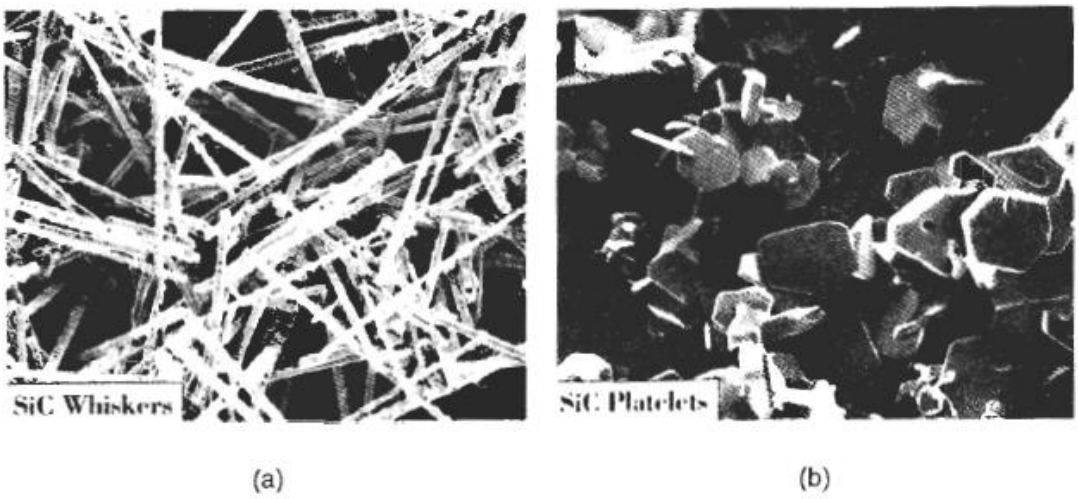


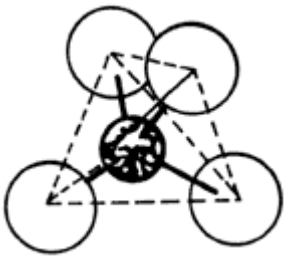

**FIGURA 14-37** Materiales de refuerzo de carburo de silicio: (a) Whiskers de SiC y (b) monocristales de SiC en forma de plaquetas. *(Cortesía de American Matrix, Inc.).*

**VIDRIOS**

Es un material sólido de estructura amorfa, que se obtiene por enfriamiento rápido de una masa fundida lo cual impide su cristalización. De aquí surge otra definición que dice que el vidrio es un líquido sobreenfriado. Esto quiere decir, de altísima viscosidad a temperatura ambiente, por lo que parece un sólido. Cuando se encuentra a 1450ºC es un líquido de baja viscosidad. A esa temperatura su temperatura su viscosidad es parecida a la de la miel. A temperatura ambiente el vidrio se comporta estructuralmente como un líquido congelado, dicho de otra forma es un líquido que se enfría tan rápidamente que es imposible que se formen cristales. Cuando el vidrio se enfría lentamente se forman cristales de vidrio, fenómeno que se conoce como desvitrificación. Los artículos hechos con vidrio desvitrificado tienen poca resistencia física.
Los vidrios más comunes (comerciales) están compuestos en un 70% por $SiO_2$, 15% de $Na_2O$, 12% de CaO. Y un 3% de diversos óxidos (de aluminio, magnesio, etc).

**ESTRUCTURA**

La mayoría de los vidrios de uso comercial están basados en el oxido de silicio, ($SiO_2$), como formador de vidrio, donde la subunidad fundamental es el tetraedro $SiO_4$, en donde un átomo de silicio se encuentra covalentemente enlazado a cuatro átomos de oxigeno. Pueden tener algunos iones modificadores adicionales que son óxidos como el CaO, $Na_2O$ que proporcionan cationes y oxígenos no enlazantes, la presencia de estos modificadores disminuye la viscosidad del vidrio a altas temperaturas haciendo que este sea más fácil de moldear.
Cuando solo está presente la sílice ($SiO_2$) el vidrio es muy rígido haciéndolo útil para aplicaciones en que se requiere una pequeña expansión térmica, pero por esta razón es muy viscoso y difícil de moldear en estado liquido lo que limita su uso.



1-Tetraedro de silicio rodeado de cuatro átomos de oxígeno.

En un cristal como el de la figura 2(a) los átomos siguen un patrón estricto de orientación que se repite n veces, siempre de la misma manera. En un vidrio, los enlaces Si-O-Si no tienen una orientación determinada (figura 2 (b)); la distancia de separación entre los átomos de Si y O no es homogénea, las unidades tetraédricas no se repiten con regularidad y el compuesto está desordenado.

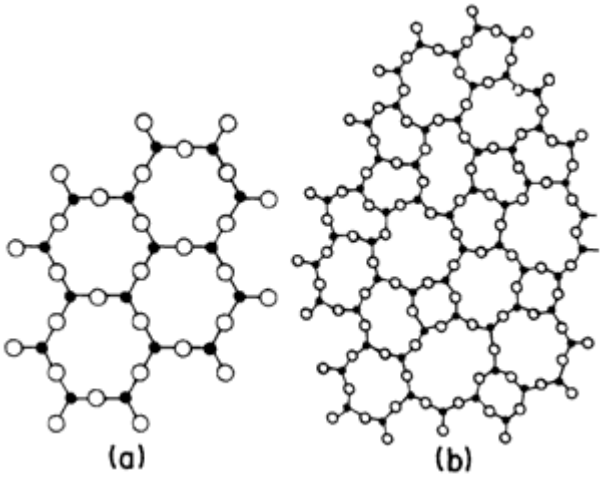



Figura 2. Representación gráfica de las diferencias estructurales entre un cristal (a) y un vidrio (b).

**PROPIEDADES**

Los vidrios no solidifican igual que los materiales cristalinos, este se hace cada vez más viscoso a medida que la temperatura disminuye aunque no existe una temperatura definida en la cual solidifique.
Con el estudio de relación entre la temperatura y el volumen específico podemos diferenciar un sólido cristalino de uno no cristalino. En los materiales cristalinos hay una disminución discontinua del volumen a temperatura constante en cambio en los materiales vítreos el volumen disminuye continuamente con la disminución de la temperatura. Se observa un pequeño cambio en la pendiente a una temperatura llamada temperatura de transición vítrea, por debajo de esta temperatura el material es un vidrio y por encima es un liquido subenfriado y luego un liquido

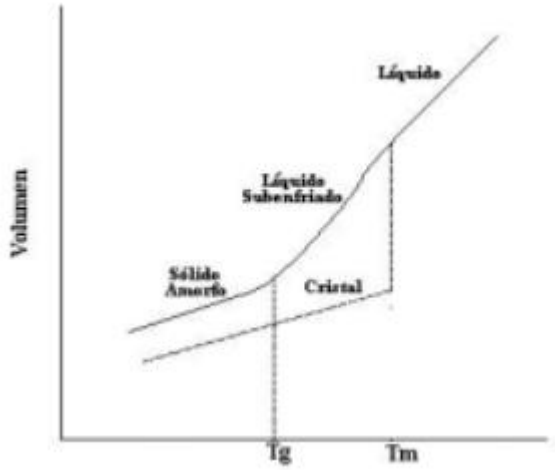



FIG 3

## CARACTERISTICAS FISICAS

### Resistencia mecánica

El vidrio tiene propiedades mecánicas que lo asemejan, por así decirlo, a los sólidos cristalinos. No es, por lo tanto, dúctil ni maleable. No sufre de formación permanente por acción de un esfuerzo, sino que alcanzado el límite de resistencia se produce su fractura. La rotura se produce siempre por un esfuerzo de tracción, no por compresión.
En líneas generales podemos decir que la resistencia intrínseca del vidrio es sumamente elevada, comparable a la del acero.

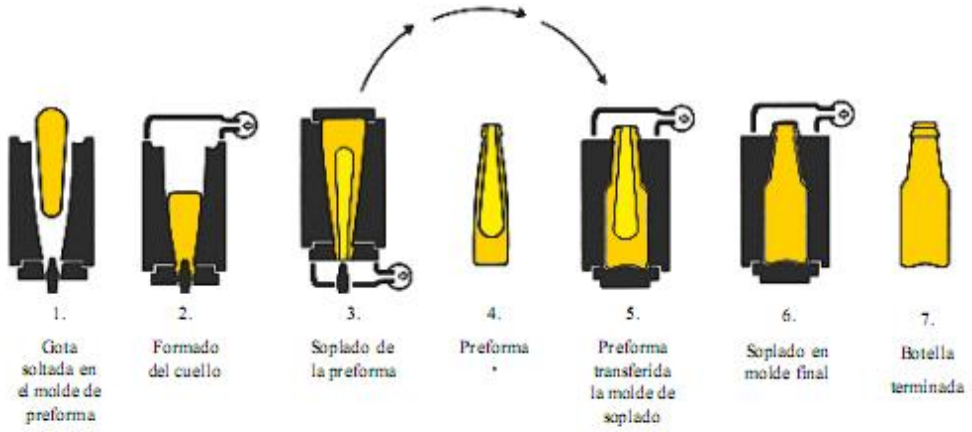
### Resistencia térmica

Ésta es una propiedad importante que se pretende en la mayoría de los vidrios, particularmente en aquellos que, como ocurre en muchos productos alimenticios y medicinales, deban soportar en su utilización cambios de temperatura relativamente bruscos, en especial, en los procesos de lavado, llenado en caliente, pasteurizado, esterilización, uso con comidas, etc.
Respecto de esta resistencia, debemos señalar que la rotura no se produce por el cambio de temperatura en sí, sino por el esfuerzo mecánico de tracción provocado por el salto térmico. Éste no es más que un medio para
Producir esfuerzos de tracción debido a las contracciones desiguales producidas por el enfriamiento más o menos brusco del ensayo.

## TECNICAS DE PROCESAMIENTO

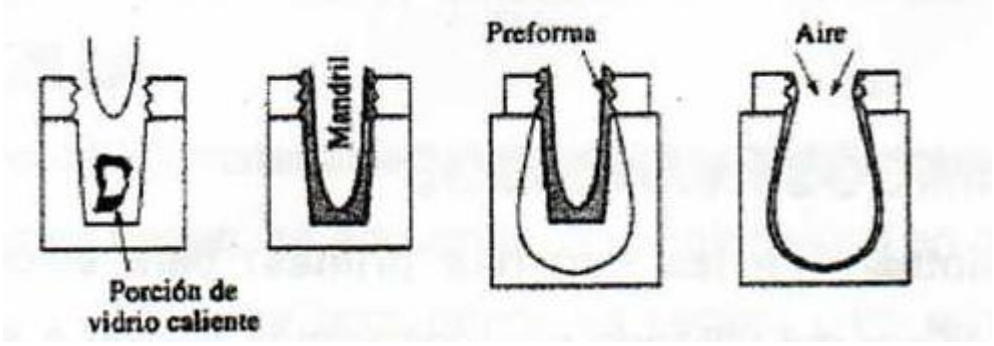
### Soplado - soplado

En la operación de soplado por boca, una varilla de hierro hueca o “caña” es sumergida en un crisol que contiene el vidrio fundido, para recoger una porción en la punta por rotación de la caña. El vidrio tomado, es enfriado a cerca de 1000°C y rotado contra una pieza de hierro para hacer una preforma. La preforma es entonces manipulada para permitir su estiramiento, nuevamente calentada y soplada para que tome una forma semejante a la del artículo que se quiere formar, siendo luego colocada en el interior de un molde de hierro o madera y soplada para darle su forma final. Se lo utiliza generalmente para el conformado de botellas.



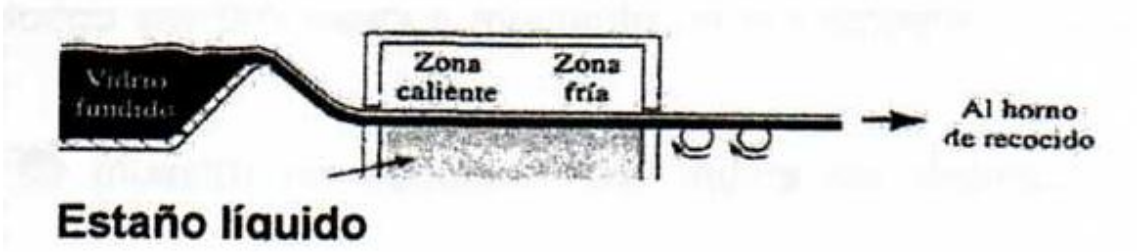

### Prensado- soplado

Un vástago es utilizado para dar forma a la superficie interior del artículo, al empujar el vidrio contra el molde exterior. El prensado puede ser hecho tanto con la ayuda de un operador, como en forma completamente automática. Luego se realiza un soplado para obtener la forma final.




**Por flotación:**

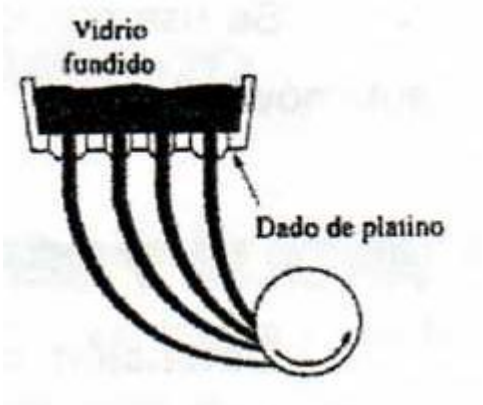
En este proceso el vidrio es mantenido en una atmósfera químicamente controlada a una temperatura suficientemente alta (1000 ºC) y por un tiempo suficientemente largo como para que el vidrio fundido quede libre de irregularidades y su superficie llegue a ser plana y paralela. En esta condición, el vidrio es vertido sobre una superficie de estaño fundido, que al ser perfectamente plana permite obtener también un producto de estas características.
La lámina es enfriada mientras aún avanza a lo largo del estaño fundido, hasta que la superficie alcanza una consistencia suficientemente como para ser transportada sobre una cinta sin que el vidrio quede marcado (aproximadamente 600ºC). La lámina entonces pasa a través de un horno túnel de recocido, mientras es transportada camino a su almacenaje, donde computadoras determinarán el corte de la lámina para satisfacer las ordenes de los clientes. Su aplicación más importante es para el conformado de ventanas.




**Por estirado:**

Se utiliza para formar piezas largas, se consiguen vidrios planos de espesor uniforme y superficies planas. Se trata de extraer verticalmente, a partir de un baño fundido de vidrio contenido en un horno de balsa, obteniendo láminas, barras, tubos y fibras.

Por estirado para formar fibras de vidrio: El vidrio fundido está contenido en una cámara calentada con resistencias de platino. La fibra se forma haciendo pasar el vidrio fundido a través de pequeños orificios en la base de la cámara.



## TRATAMIENTOS TERMICOS

### Recocido

El proceso de recocido es utilizado para liberar las tensiones internas, que se producen debido al rápido e irregular enfriamiento de la pieza de vidrio durante la operación de formado.
Para ello la pieza es vuelta a calentar y luego enfriada lentamente.
La operación se realiza utilizando para ello un horno túnel de recocido, que consiste básicamente en una serie de quemadores dispuestos en un horno largo, a través del cual son llevadas las piezas de vidrio.

### Templado

La pieza de vidrio se calienta a una temperatura mayor a la de transición vítrea y se enfría rápidamente a temperatura ambiente. Primero la superficie se enfría más rápidamente y una vez que alcanza una temperatura inferior al punto de deformación esta adquiere rigidez, en este momento el interior esta a una temperatura superior y todavía es plástica, al seguir con el enfriamiento el interior intenta contraerse en un grado mayor que el que le permite la superficie rígida exterior y tiende a tirarla hacia adentro. Como consecuencia la pieza soporta esfuerzos de compresión en la superficie con esfuerzo de tracción en el interior, aumentando su resistencia a la formación de grietas por tracción, lográndose mejores propiedades mecánicas.
Esta técnica se utiliza cuando se desea una alta resistencia.