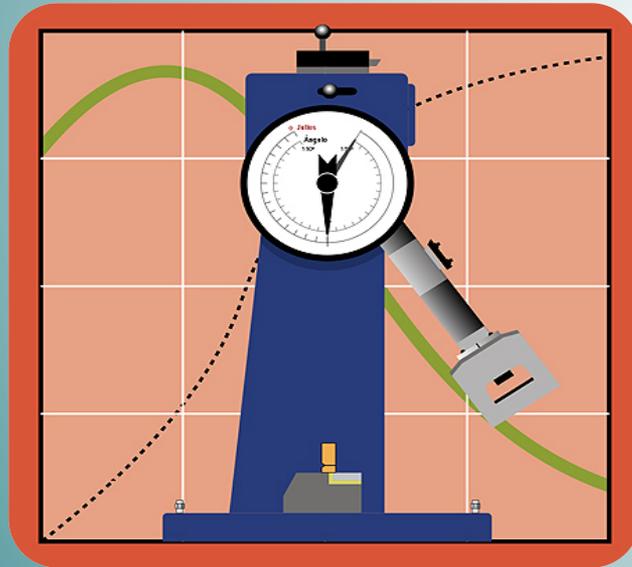


Materiales-G704/G742

Lección 15. Cerámicos y vidrios



Jesús Setién Marquínez
Jose Antonio Casado del Prado
Soraya Diego Cavia
Carlos Thomas García

Departamento de Ciencia e Ingeniería del
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

15.1 INTRODUCCIÓN

- Los materiales cerámicos se han utilizado tradicionalmente en ingeniería y construcción.



- Grandes obras en piedra de la humanidad (pirámides, coliseo, muralla china...).



El cemento y el hormigón han sustituido actualmente a la piedra.

Los cerámicos son compuestos químicos inorgánicos formados por metales y no metales (óxidos, nitruros y carburos).

Vidrios genéricos.

| <i>Vidrios</i> | <i>Composición típica (% en peso)</i> | <i>Usos habituales</i> |
|-----------------------|--|---|
| Vidrios sodocálcicos | 70 SiO ₂ , 10 CaO, 15 Na ₂ O | Ventanas, botellas, etc.; de conformado fácil |
| Vidrios borosilicatos | 80 SiO ₂ , 15 B ₂ O ₃ , 5 Na ₂ O | Pirex; material de vidrio de cocina y químico; resistencia a alta temperatura, bajo coeficiente de expansión, buena resistencia al choque térmico |

Vitrocerámicas genéricas.

| <i>Cerámica</i> | <i>Composición típica</i> | <i>Usos habituales</i> |
|--|--|---|
| Porcelana China Alfarería Ladrillos | De arcilla: hidroxí-alumino-silicatos como Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄ mezclado con otros minerales inertes | Aislantes eléctricos. Vajillas, piezas artísticas. Construcción; usos refractarios. |

Cerámicas de altas prestaciones genéricas.

| <i>Vidrios</i> | <i>Composición típica</i> | <i>Usos habituales</i> |
|------------------------------|---|--|
| Alúmina densa | Al ₂ O ₃ | Herramientas de corte, matrices; superficies resistentes al desgaste, cojinetes; implantes médicos; piezas de motores y turbinas; blindajes. |
| Carburo de silicio, nitruros | SiC, Si ₃ N ₄ | |
| Sialones | p.ej. Si ₂ AlON ₃ | |
| Circona cúbica | ZrO ₂ + 5% en peso MgO | |

Cerámicas naturales genéricas.

| <i>Cerámicas</i> | <i>Composición</i> | <i>Usos habituales</i> |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Piedra caliza (mármol) | En gran parte CaCO_3 | Cimientos de edificios, construcción |
| Piedra arenisca | En gran parte SiO_2 | |
| Granito | Aluminino silicatos | |
| Hielo | H_2O | Ingeniería ártica |

Materiales compuestos cerámicos.

| <i>Materiales compuestos cerámicos</i> | <i>Componentes</i> | <i>Usos habituales</i> |
|--|------------------------------|---|
| Fibra de vidrio | Vidrios-polímero | Estructuras de altas prestaciones |
| CFRP | Carbono-polímero | |
| Cermet | Carburo de wolframio-cobalto | Herramientas de corte, matrices |
| Hueso | Hidroxiapatita-colágeno | Principal material estructural de los animales |
| Nuevos materiales compuestos cerámicos | Alúmina-carburo de silicio | Aplicaciones de alta temperatura y alta tenacidad |

Propiedades generales:

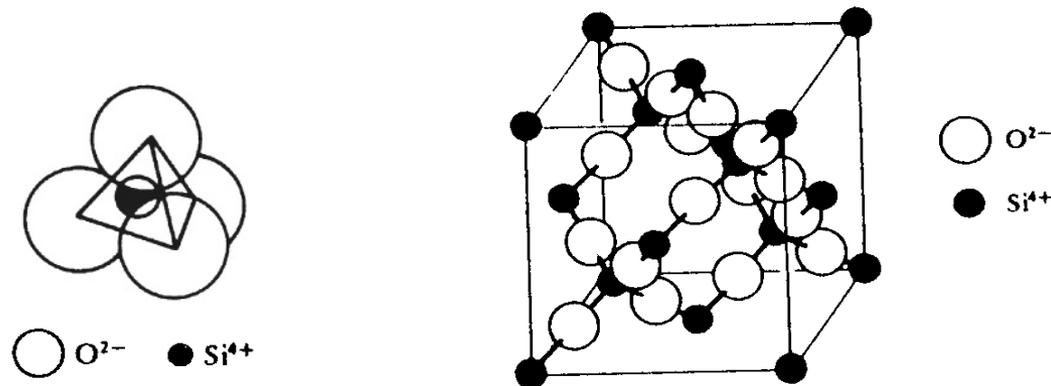
- 1. Elevada Dureza.**
- 2. Alta Fragilidad.**
- 3. Alto punto fusión.**
- 4. Gran aislamiento térmico y eléctrico.**
- 5. Estabilidad a altas temperaturas.**

15.2 CERÁMICOS CRISTALINOS

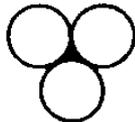
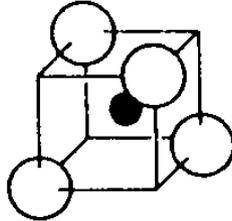
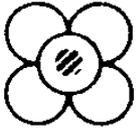
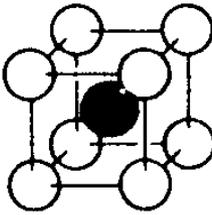
- **Cerámicas iónicas:** compuestos de 1 metal + 1 no metal (NaCl , MgO , ZrO_2 , Al_2O_3 ...). La carga eléctrica está equilibrada \Rightarrow cada ión se rodea de un número de iones del otro elemento (número de coordinación).
- **Cerámicas covalentes:** compuestos de 2 no metales (SiO_2) o elementos puros (Si , diamante). El número de enlaces covalentes necesarios para formar el compuesto, determina el número de vecinos cercanos a un átomo dado.

Ejemplo – Sílice (SiO_2):

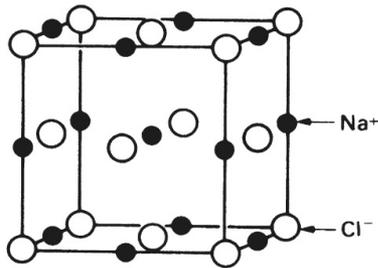
El enlace requiere que los átomos de Si tengan 4 vecinos (estructura tetraédrica).



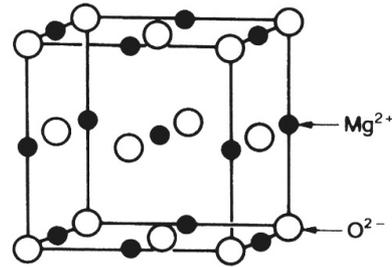
- La relación de radios iónicos afecta al número de coordinación:

| <i>Número de coordinación</i> | <i>Ubicación de intersticios</i> | <i>Relación de radios</i> | <i>Representación</i> |
|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------|---|
| 2 | Lineal | 0–0.155 |  |
| 3 | Vértices del triángulo | 0.155–0.225 |  |
| 4 | Vértices del tetraedro | 0.225–0.414 |  |
| 6 | Vértices del octaedro | 0.414–0.732 |  |
| 8 | Vértices del cubo | 0.732–1.000 |  |

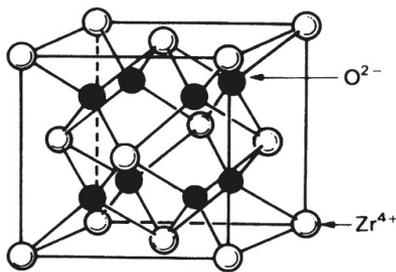
• Ejemplos de estructuras cerámicas iónicas:



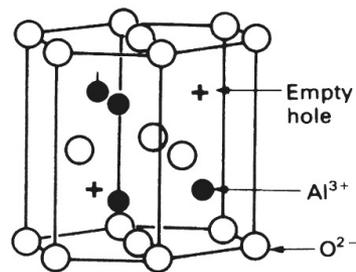
NaCl



MgO

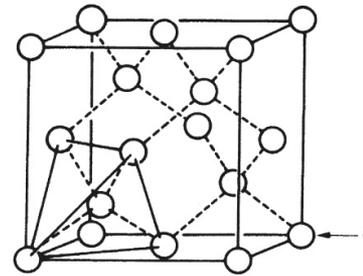


ZrO₂

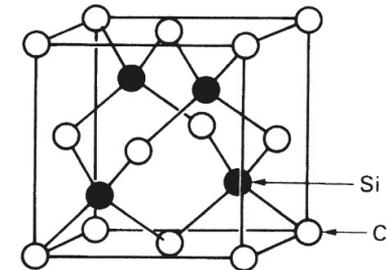


Al₂O₃

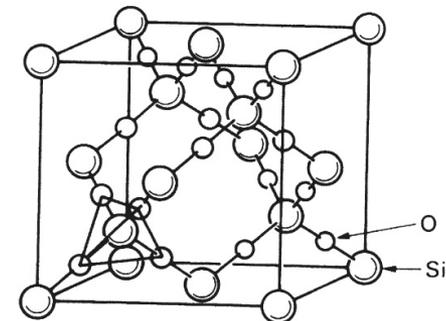
• Ejemplos de estructuras cerámicas covalentes:



Diamante



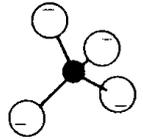
SiC



SiO₂

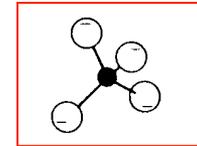
15.3 SÍLICE Y SILICATOS

- Estructuras basadas en el tetraedro de la sílice (SiO_4^{4-}), uniéndose los iones de oxígeno de los vértices con iones o grupos iónicos para equilibrar las cargas.

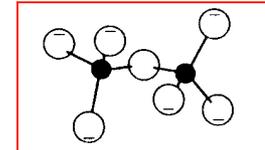


- **Silicatos simples:**

- Los tetraedros se combinan con iones metálicos: Mg_2SiO_4 , Fe_2SiO_4 :



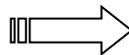
- Pueden unirse 2 tetraedros compartiendo un vértice y combinarse con cationes: $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$:



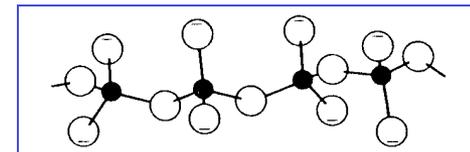
- **Estructuras de anillo y de cadena:**

- Se comparten 2 vértices del tetraedro y forman anillos o cadenas:

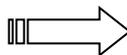
MgSiO_3 (enstatita)



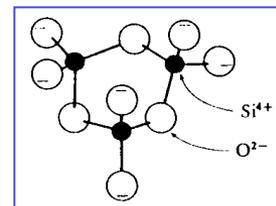
Estructura de cadena



CaSiO_3 (wollastonita)



Anillos de Si_3O_9

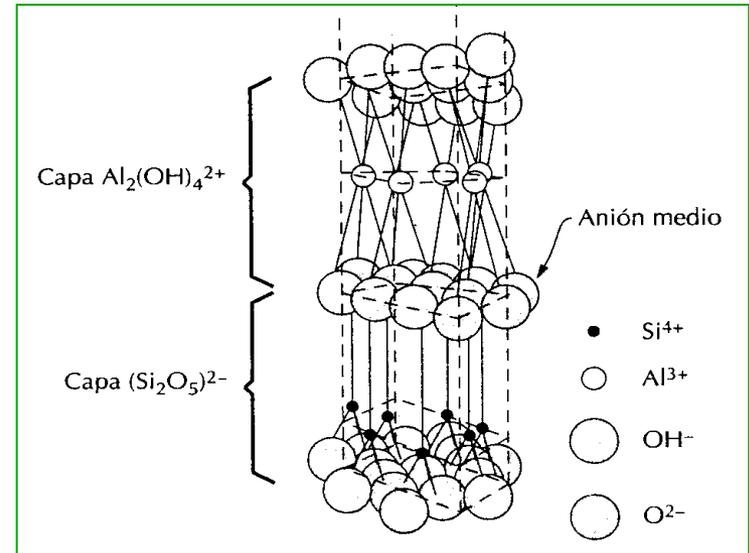


• **Estructuras laminares:**

- Los tetraedros pueden unirse en un plano y producir estructuras laminares, **filosilicatos:**

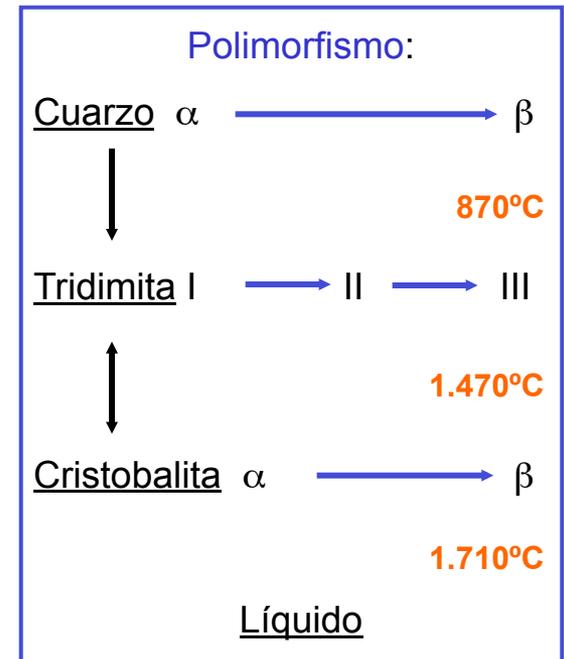
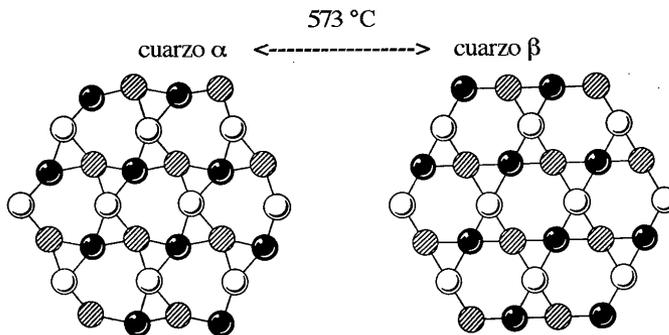


Montmorillonita, talco, micas, etc.



• **Sílice:**

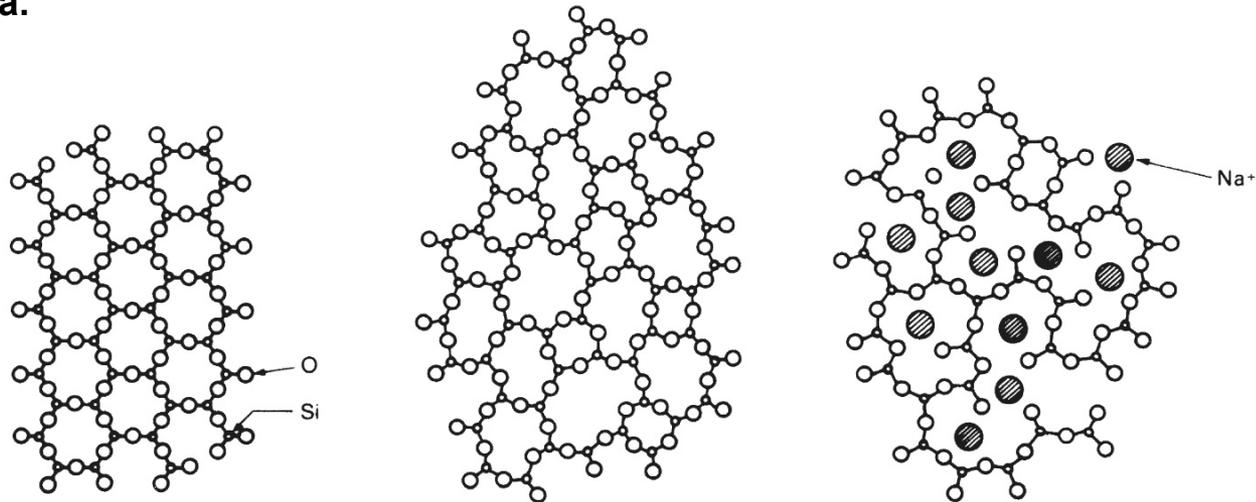
- Se comparten los 4 vértices del tetraedro, se obtiene la estructura de la sílice (SiO_2) con sus variedades polimórficas: **cuarzo (α y β)**, **tridimita (I, II y III)** y **cris-tobalita (α y β)**.



15.4 CERÁMICOS NO CRISTALINOS

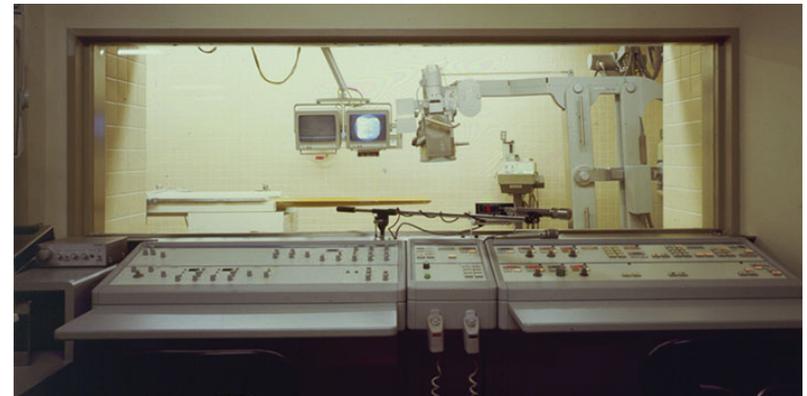
• Vidrios:

- Se basan en la sílice, formándose por unión de tetraedros, pero agrupados de forma amorfa.

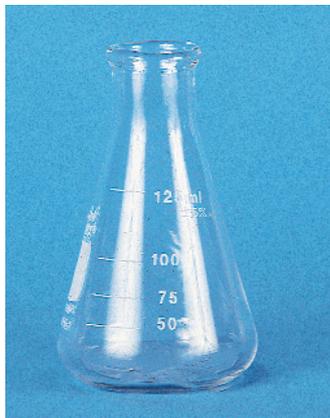


- Red aleatoria con alta temperatura de reblandecimiento, gran resistencia, estabilidad y baja expansión térmica.
- El vidrio de sílice pura es difícil de trabajar \Rightarrow adición modificadores de red (Na_2O , CaO) para reducir su temperatura de fusión.

| Vidrios | SiO ₂ | Na ₂ O | K ₂ O | CaO | B ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | Otros | Observaciones |
|------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|--|
| 1. Sílice (fundida) | 99,5+ | | | | | | | Difícil de fundir y de fabricar, pero útil hasta temperaturas de 1.000 °C. Muy baja expansión y alta resistencia al choque térmico. |
| 2. Sílice 96 % | 96,3 | <0,2 | <0,2 | | 2,9 | 0,4 | | Fabricado a partir de vidrios relativamente suaves de borosilicato; se calienta para separar las fases de SiO ₂ y B ₂ O ₃ , lixiviación ácida de la fase B ₂ O ₃ , se calienta para consolidar los poros. |
| 3. Soda-cálcica: láminas de vidrio | 71-73 | 12-14 | | 10-12 | | 0,5-1,5 | MgO, 1-4 | Fácilmente fabricable. Usado ampliamente en una gran variedad de aplicaciones, para ventanas, contenedores y bombillas eléctricas. |
| 4. Silicato de plomo: eléctricos | 63 | 7,6 | 6 | 0,3 | 0,2 | 0,6 | PbO, 21 MgO, 0,2 | Fácilmente fundible y fabricado con buenas propiedades eléctricas. El de alto contenido en plomo absorbe los rayos X; el alto índice de refracción es útil en lentes aromáticas. Vidrio para cristal decorativo. |
| 5. Alto contenido en plomo | 35 | | 7,2 | | | | PbO, 58 | |



| Vidrios | SiO ₂ | Na ₂ O | K ₂ O | CaO | B ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | Otros | Observaciones |
|---|------------------|-------------------|------------------|-----|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|--|
| 6. Borosilicato; baja expansión | 80,5 | 3,8 | 0,4 | | 12,9 | 2,2 | | Baja expansión, buena resistencia al choque térmico y estabilidad química. Utilizado ampliamente en la industria química. |
| 7. Baja pérdida eléctrica | 70,0 | | 0,5 | | 28,0 | 1,1 | PbO, 1,2 | Bajas pérdidas dieléctricas. |
| 8. Aluminoborosilicato: aparatos estándar | 74,7 | 6,4 | 0,5 | 0,9 | 9,6 | 5,6 | B ₂ O ₃ , 2,2 | Contenidos altos en alúmina y bajos en óxido bórico, que mejoran la durabilidad química. |
| 9. Bajo álcali (vidrios E) | 54,5 | 0,5 | | 22 | 8,5 | 14,5 | | Usado ampliamente para fibras en compuestos de resina-vidrio. |
| 10. Aluminosilicato | 57 | 1,0 | | 5,5 | 4 | 20,5 | MgO, 12 | Resistencia a altas temperaturas, baja expansión. |
| 11. Cerámica vítrea | 40-70 | | | | | 10-35 | MgO, 10-30 TiO ₂ 7-15 | Cerámica cristalina fabricada por desvitrificación del vidrio. Fácil fabricación (como vidrio) y buenas propiedades. Diferentes vidrios y catalizadores. |



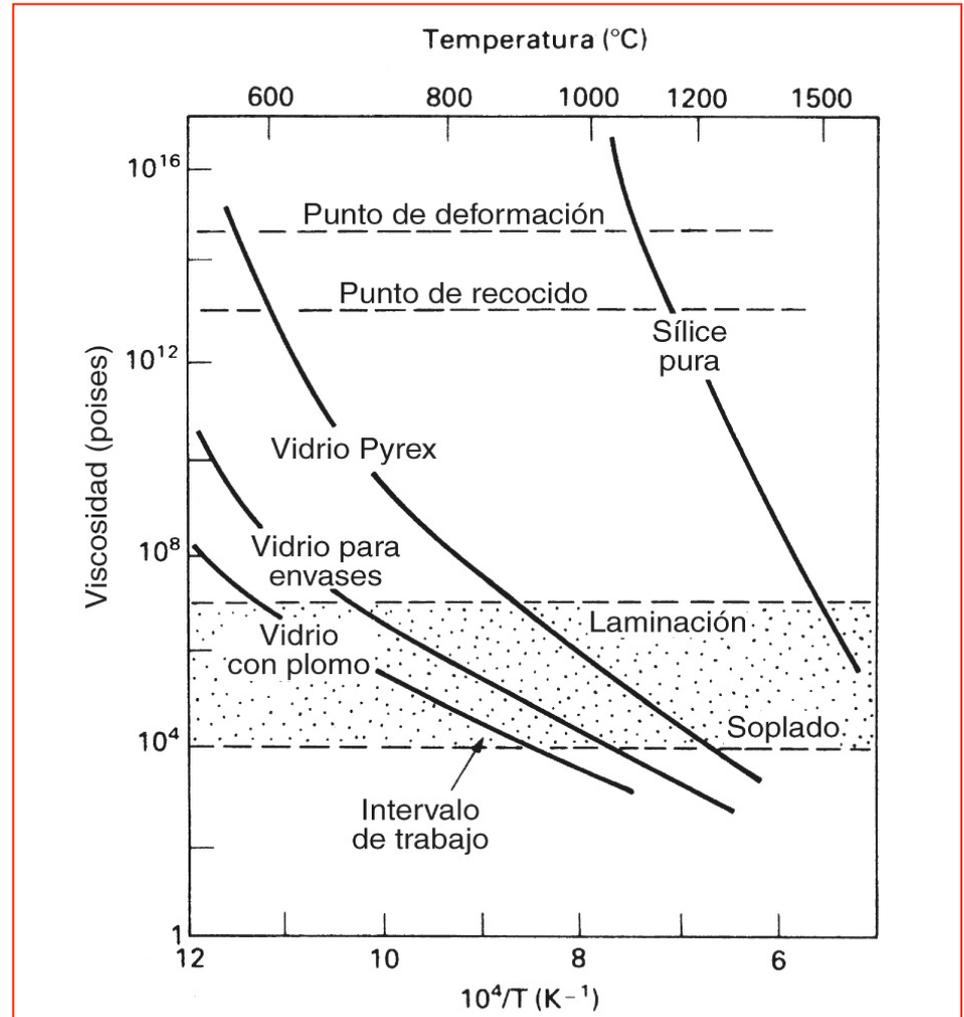
Fabricación de vidrios

Los vidrios se producen por fusión y posterior moldeo seguido de un tratamiento térmico:

- 1.- Fusión de materias primas.
- 2.- Conformado.
- 3.- Tratamiento térmico.
- 4.- Acabado.

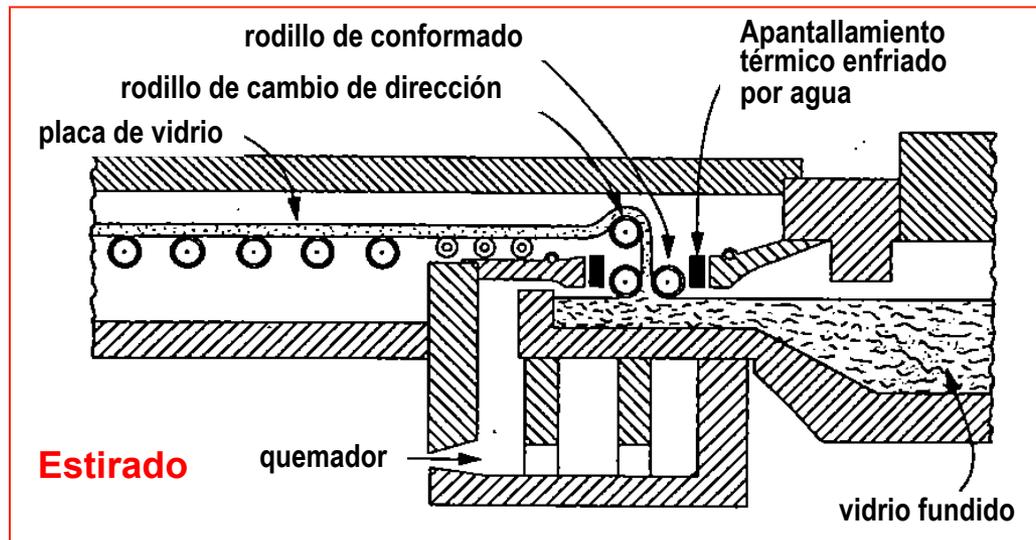
Diagrama $\eta - T$

- Punto de fusión ($\eta = 100 \text{ P}$).
- Punto de trabajo ($\eta = 10^4 \text{ P}$).
- Punto de ablandamiento ($\eta = 4 \cdot 10^7 \text{ P}$).
- Punto de recocido ($\eta = 10^{13} \text{ P}$).
- Punto de deformación ($\eta = 3 \cdot 10^{14} \text{ P}$).
- **Temperatura vitrificación** ($\eta = 10^{17} \text{ P}$).

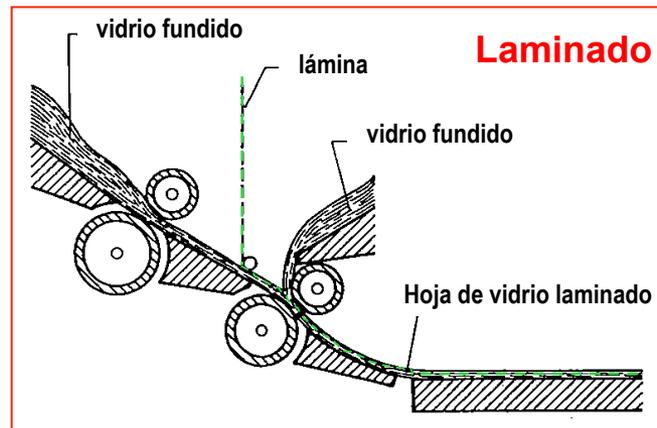
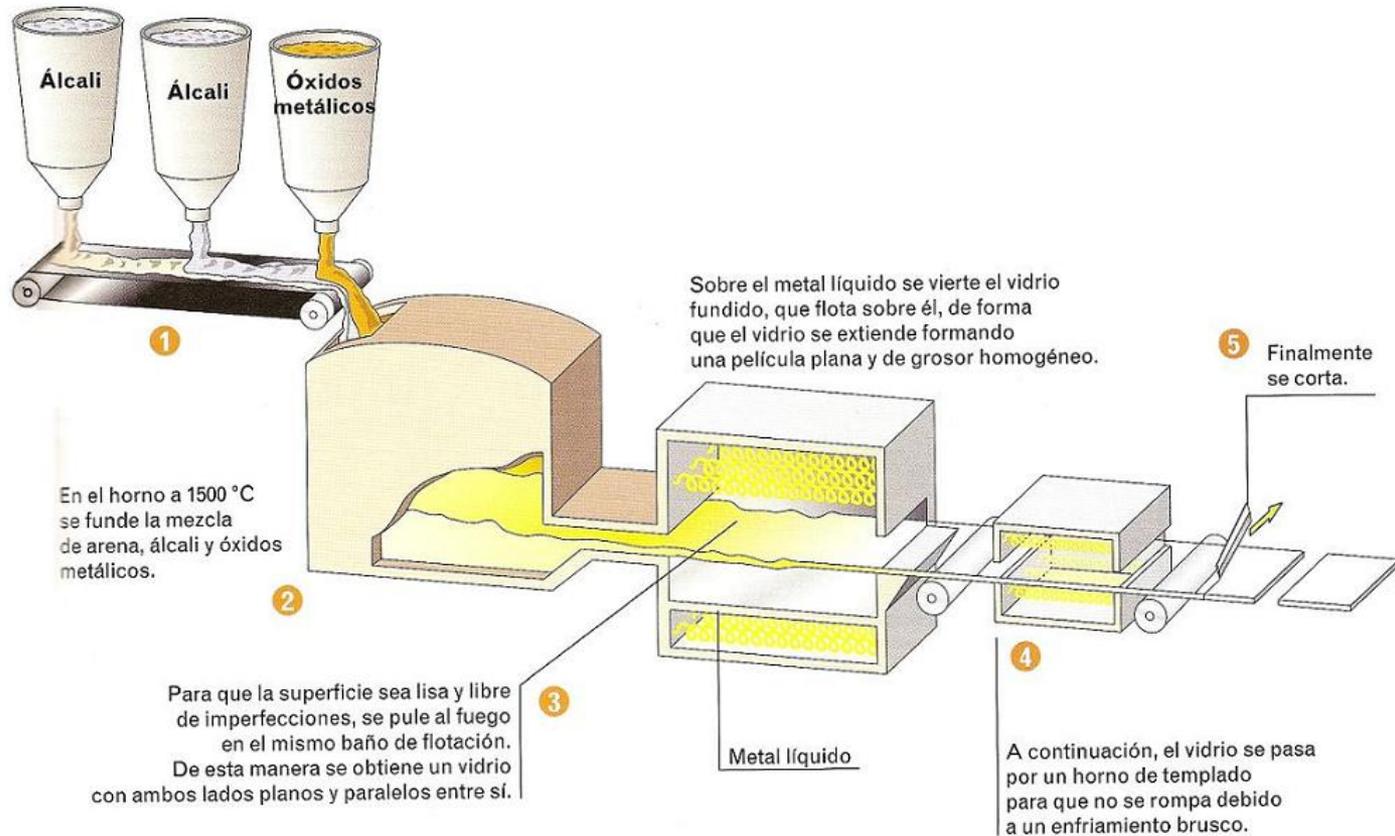


Conformado de vidrio plano

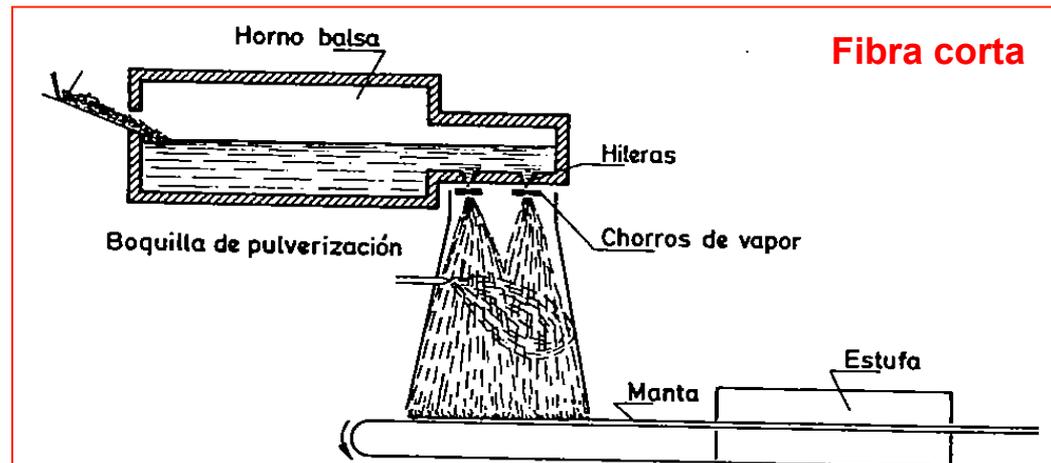
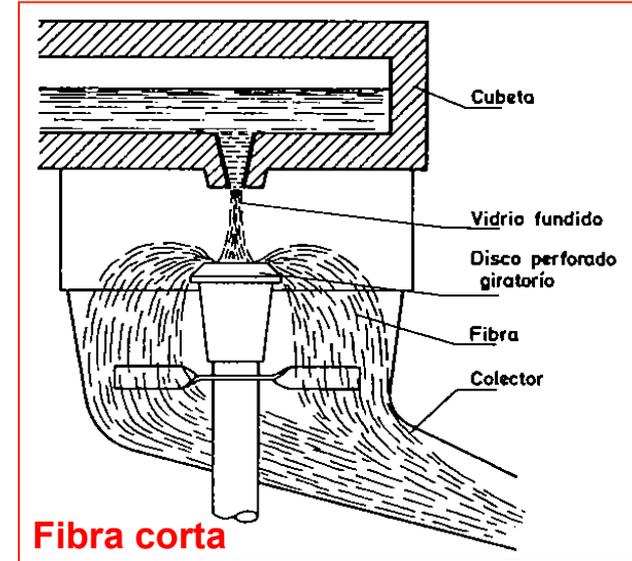
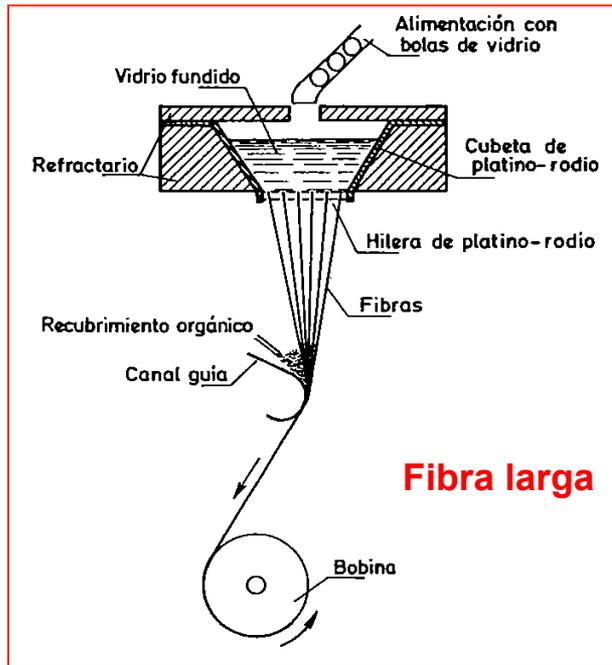
Soplado a boca



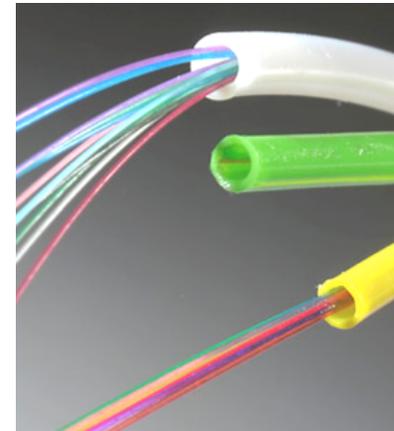
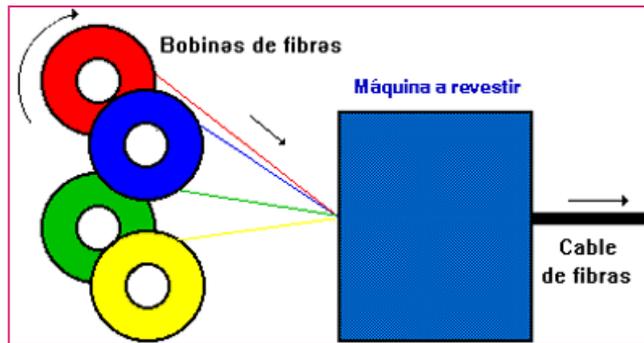
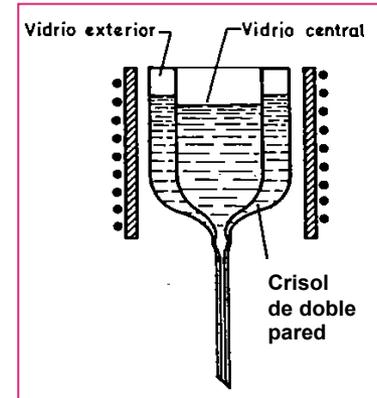
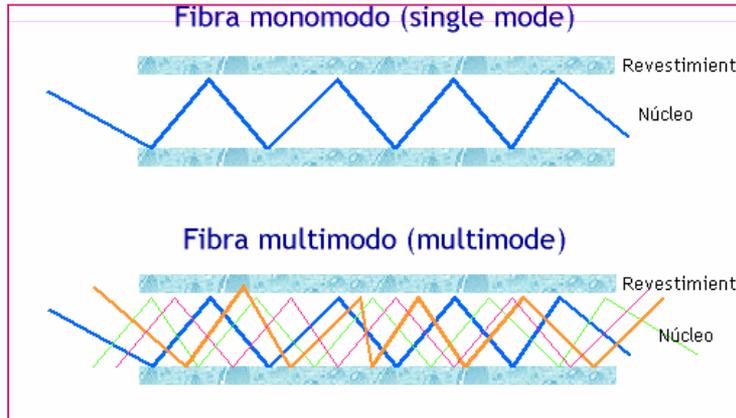
Flotado



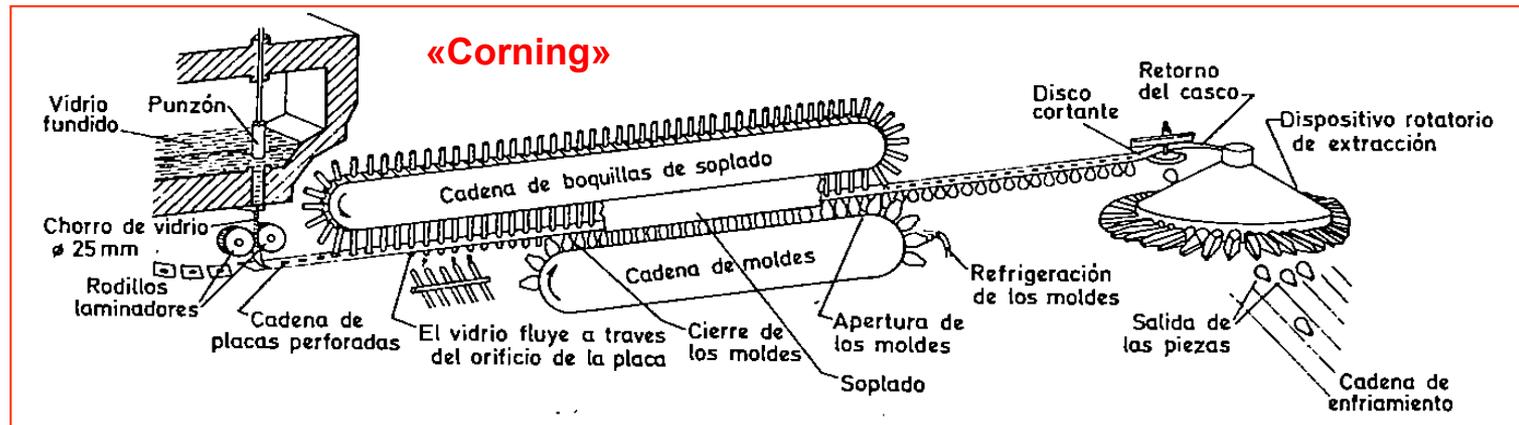
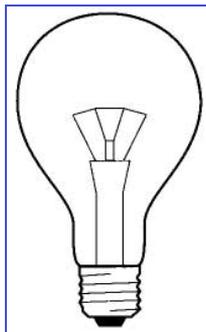
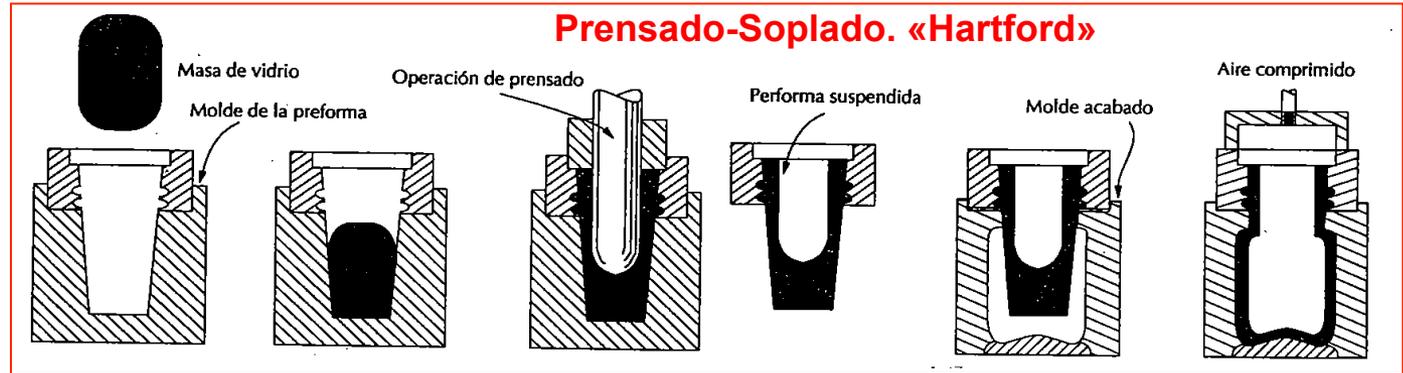
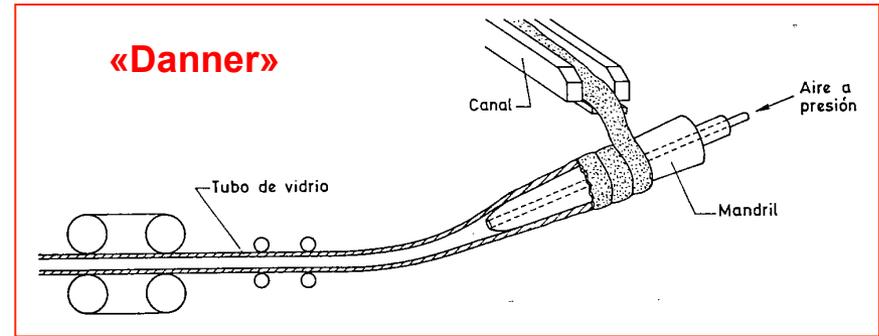
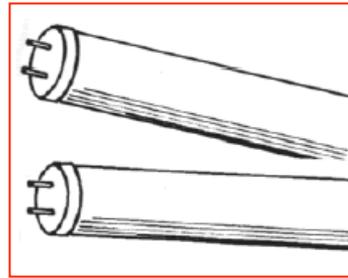
Hilado: Conformado de fibra de vidrio (aislante o de refuerzo)



Conformado de fibra de vidrio (óptica)



Conformado de Tubos / Recipientes



Otras técnicas de conformado de vidrios

Fundición



Prensado

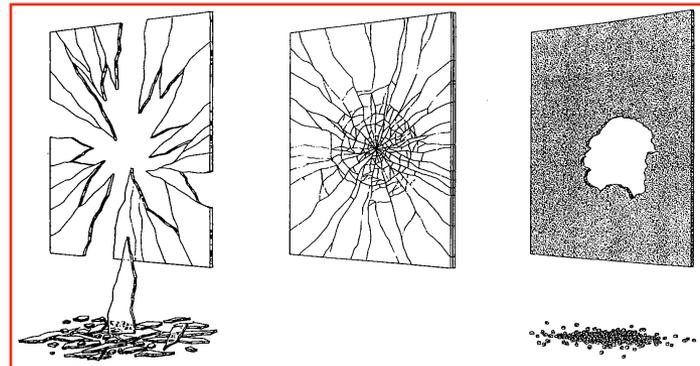


Centrifugado



Tratamiento térmico y acabado de vidrios

- **Recocido:** tratamiento isoterma a la temperatura en el punto de recocido para eliminar las tensiones internas debidas al enfriamiento.
- **Temple:** tratamiento térmico o químico para inducir tensiones de compresión en superficie a fin de evitar que se propaguen los defectos superficiales.



Recocido



Laminado



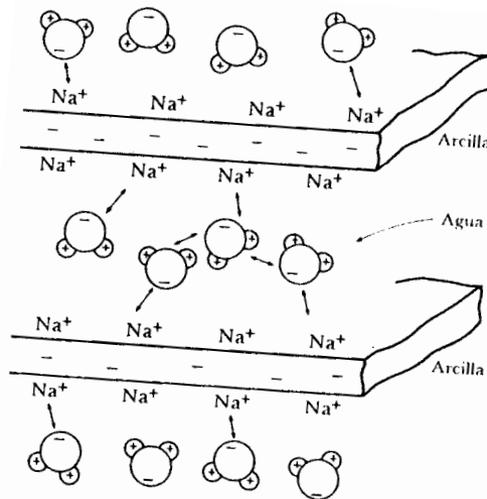
Templado

• Cerámicas vítreas

- Son las vasijas de barro (alfarería), ladrillos, azulejos, sanitarios, etc., de gran durabilidad.

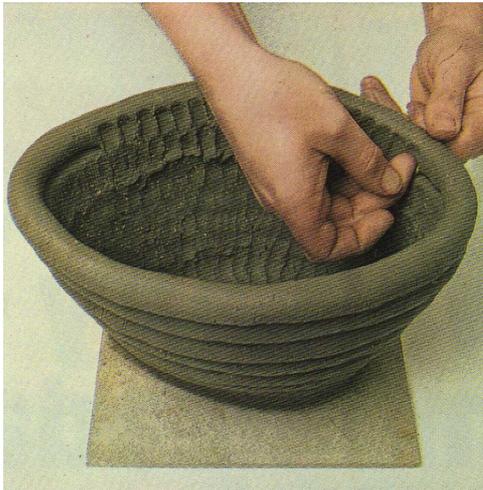


- Se obtienen de arcillas (**filosilicatos**), humedeciéndolas con agua hasta conseguir una pasta trabajable (**hidroplasticidad**).



- **Conformado hidropoplástico:** plasticidad de mezcla de arcilla y agua.

Moldeo manual



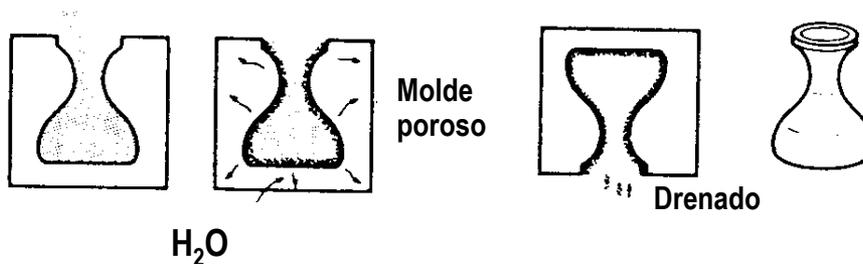
Moldeo con torno



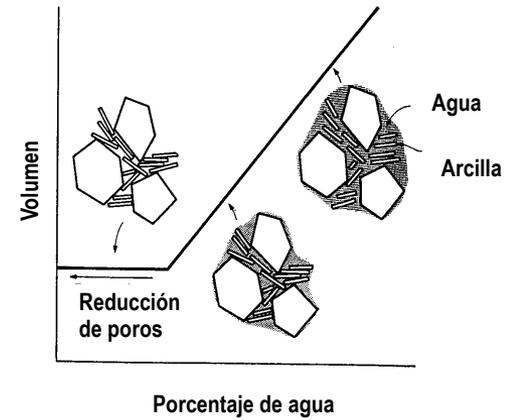
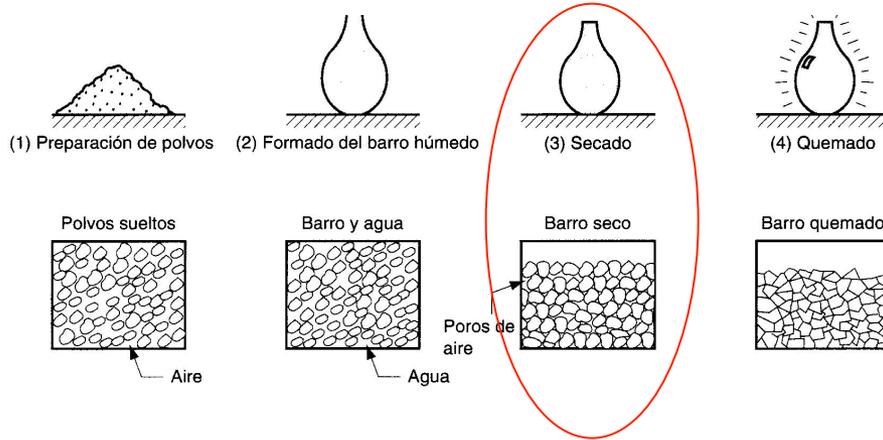
Extrusión



- **Moldeo por escurrimiento (barbotina):** suspensión de arcilla en agua que se vierte en un molde poroso.



- **Secado:** control de la velocidad de eliminación de agua para evitar defectos por contracción.



- **Cocción:** crecimiento del tamaño de grano y endurecimiento por reducción de la porosidad

- Se cuecen en horno (**800 – 1.400 °C**) formándose un vidrio líquido que, al enfriar, aglutina los silicatos cristalinos y densifica el producto. El **grado de vitrificación** condiciona las propiedades finales (**resistencia, densidad y porosidad**).



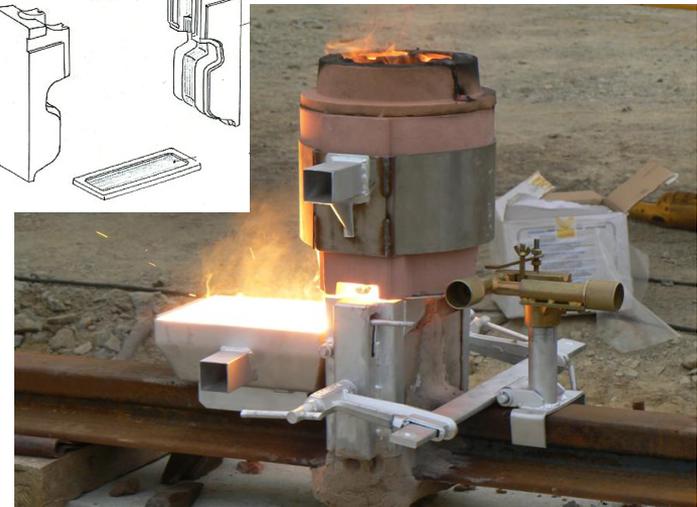
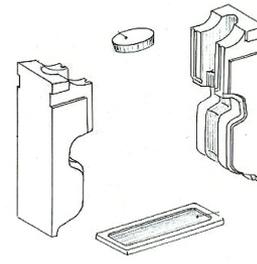
- Para proteger, impermeabilizar y/o decorar la superficie se suele sellar mediante un tratamiento de acabado (**vidriado o esmaltado**).



15.5 CERÁMICOS DE ALTAS PRESTACIONES

• Refractarios:

- Partículas gruesas (**GROG**): SiO_2 , Al_2O_3 o MgO unidas por fundentes (Porosidad: 20 – 25%).
- Revestimientos de hornos, resistencias eléctricas o crisoles.
- Aplicaciones condicionadas por la **composición**: **ácido** (SiO_2), **básico** (MgO) o **neutro** (Cr_2O_3).



• **Abrasivos:**

- Se utilizan para **desgastar**, **desbastar** o **cortar** otros materiales.
- Elevada dureza y resistencia al desgaste y cierto grado de refractariedad.
- Los abrasivos son el **diamante**, el **corindón** (Al_2O_3), el **SiC**, el **WC** y la **arena de sílice**.
- Se pueden utilizar como muelas, o revestimientos.



• Cerámicas eléctricas y magnéticas:

- Propiedades ferroeléctricas y piezoeléctricas del **titanato de bario** (BaTiO_3): condensadores, transductores, termistores, piezas para micrófonos...
- La porcelana y el vidrio se utilizan como aislantes para altos voltajes.
- Las **ferritas** y los **granates** (YFe , YAl , YGd) tienen propiedades ferrimagnéticas.



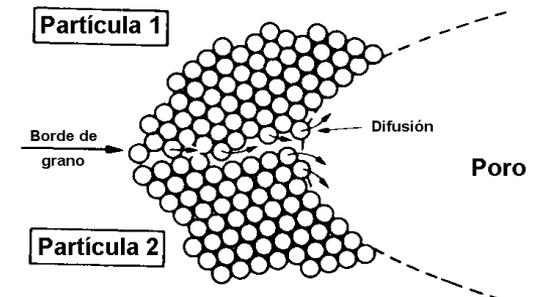
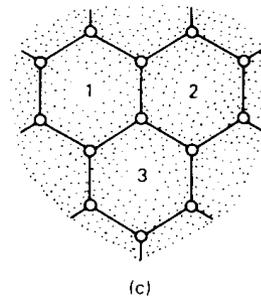
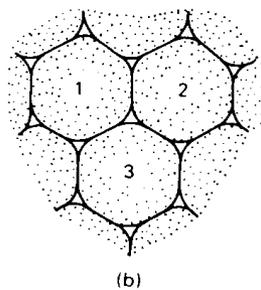
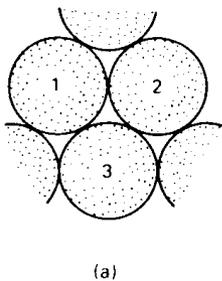
• **Cerámicas avanzadas:**

- **Cerámicas tenaces:**
 - Valores altos de tenacidad combinados con distribución adecuada de microfisuras: ZrO_2 parcialmente estabilizada (PSZ).
- **Sialones:**
 - Compuestos de Silicio, Aluminio, Oxígeno y Nitrógeno (Ej: Si_2AlON_3) empleados en blindajes y piezas de motores de altas prestaciones.
- **Vitrocerámicas:**
 - Desvitrificación controlada del vidrio (Pyroceram®): $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$
 - Valores altos de conductividad térmica y resistencia al choque térmico.



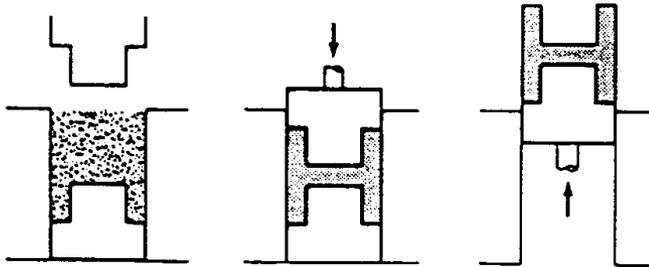
Fabricación de cerámicos de altas prestaciones

- La técnica más corriente es el **prensado** del material en forma de polvo con posterior **sinterización** del producto a alta temperatura para favorecer la difusión.
- Obtención del cerámico (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC , Si_3N_4 ...) en forma pulverulenta.
- La difusión se realiza por bordes de grano hacia los poros y la sinterización se ve favorecida por la temperatura ($T_s \sim 2/3 T_M$).

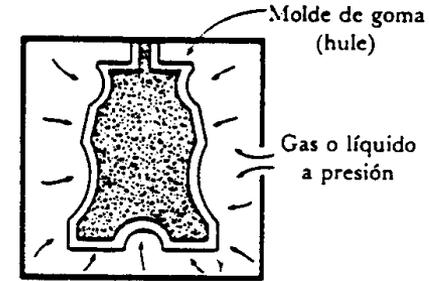


- El material se compacta en una matriz a una preforma inicial para dar lugar al **cuerpo verde**.

Prensado

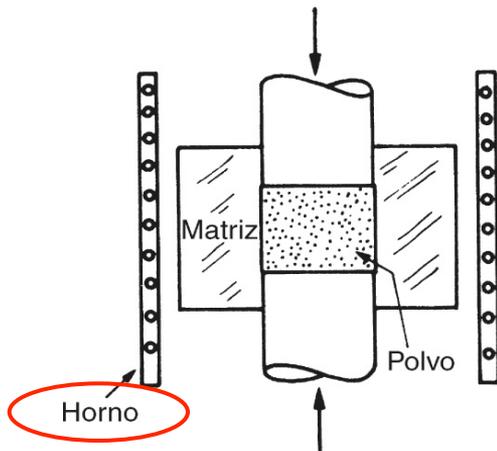


Prensado hidrostático

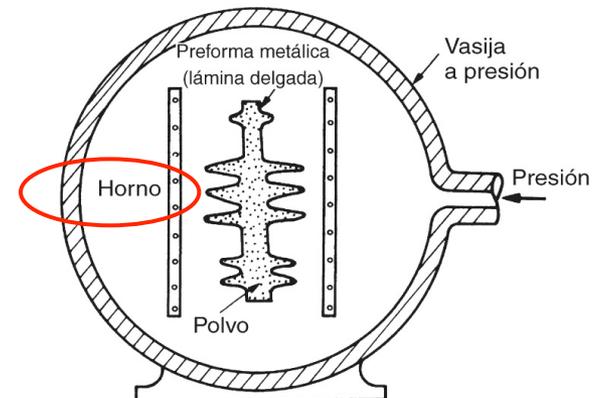


- Si el compacto se sinteriza en horno se obtiene el componente sin necesidad de acabado, consiguiendo mayor densidad mediante el prensado en caliente (normal o isostático).

Prensado normal

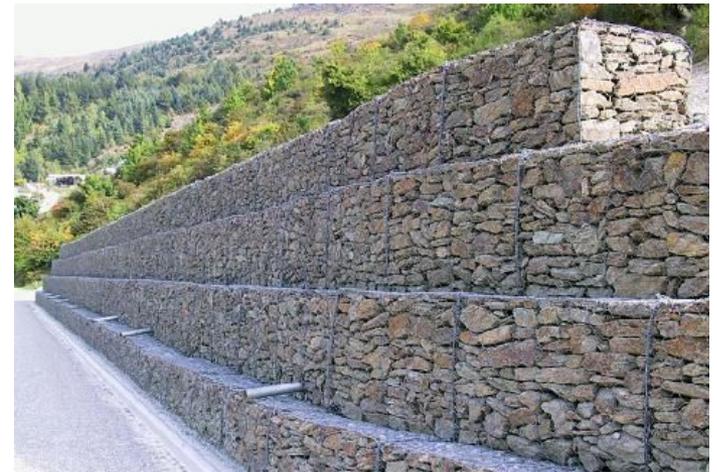


Prensado hidrostático (hip)



15.6 CERÁMICOS NATURALES

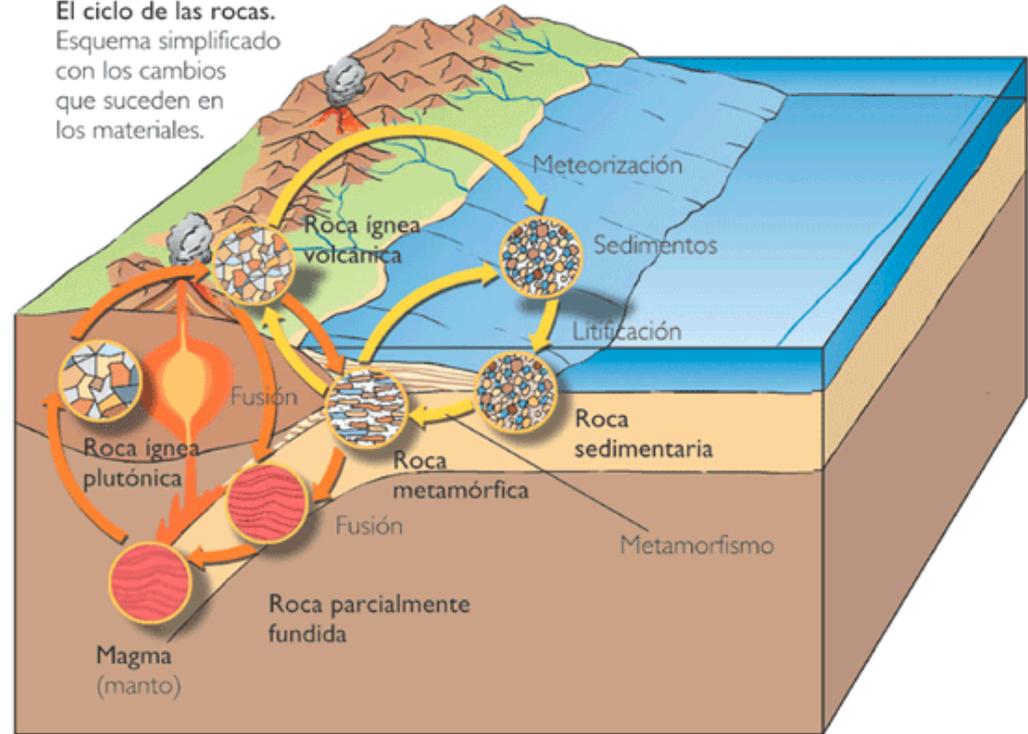
- Se caracterizan por su durabilidad e inalterabilidad (Ej: caliza, mármol, arenisca, granito...).



- Atendiendo a su origen, las rocas naturales se clasifican en:
 - Rocas **ígneas** o **magmáticas**: se forman por la solidificación del **magma**. El proceso es lento, cuando ocurre en las profundidades de la corteza (rocas **plutónicas** o **intrusivas**), o más rápido, si acaece en la superficie (rocas **volcánicas** o **extrusivas**). Ejemplos: **basalto**, **granito**, **gabro**, **diorita**, **obsidiana**, etc.
 - Rocas **sedimentarias**: se forman por **diagénesis** (compactación y cementación) de los sedimentos, materiales procedentes de la alteración en superficie de otras rocas, que posteriormente son transportados y depositados por el agua, el hielo y el viento, con ayuda de la gravedad o por precipitación desde disoluciones. Ejemplos: **caliza**, **marga**, **arenisca**, **yeso**, etc.
 - Rocas **metamórficas**: producidas por la evolución de las anteriores a partir de altas presiones y temperaturas. Ejemplos: **mármol**, **cuarcita**, **esquisto**, **pizarra**, **gneis**, etc.



El ciclo de las rocas.
Esquema simplificado
con los cambios
que suceden en
los materiales.



15.7 PÉTREOS ARTIFICIALES

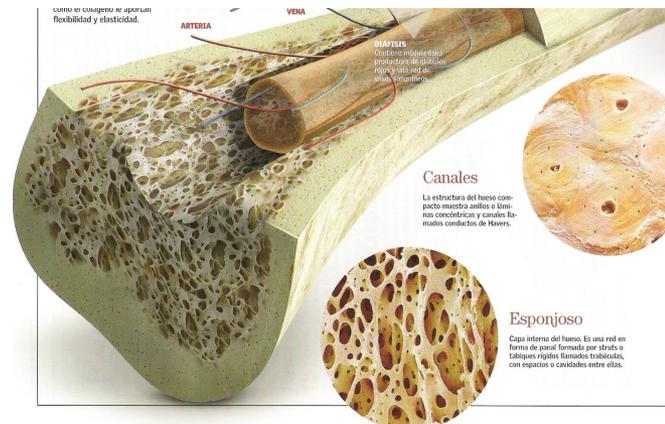
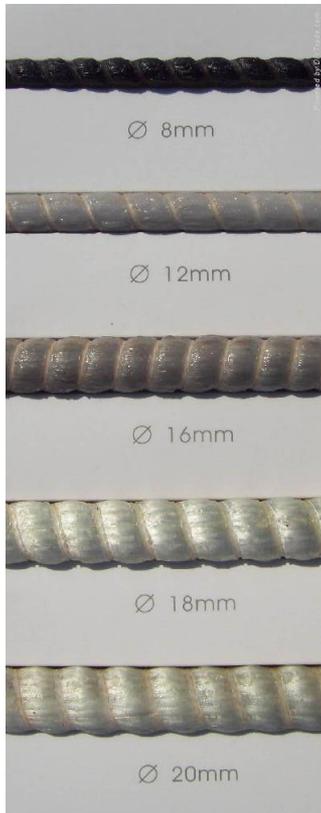
Cementos, morteros y hormigones para ingeniería civil:

- El **cimento** tiene la propiedad de endurecer cuando se mezcla con agua.
- El **hormigón** es un material compuesto de áridos unidos entre sí por cemento.



15.8 COMPUESTOS CERÁMICOS

- Su rigidez y dureza puede combinarse con la tenacidad de los polímeros (**GFRP, CFRP**), los metales (**cermets: W – Co**) e incluso con otros cerámicos.



15.9 PROPIEDADES GENERALES DE LOS CERÁMICOS

- Los materiales cerámicos pueden cumplir una **función ornamental** (jarrones, adornos...) y de **servicio** (vajillas, ceniceros...) sin necesidad de soportar cargas significativas, aunque sí arañazos, desgaste, choques térmicos...
- Los **ladrillos** y el **cemento** se utilizan deliberadamente por su capacidad portante.
- Las **cerámicas tenaces** y los **abrasivos** son usados en condiciones muy exigentes de tensión y temperatura.
- Existe una gran disparidad entre las características físicas de los metales y las cerámicas, por lo que se emplean en aplicaciones totalmente distintas y complementarias.



• **Módulo de elasticidad:**

- Los módulos de las cerámicas son generalmente más altos que los de los metales, reflejando con ello la mayor rigidez del enlace iónico o del enlace covalente.
- Dado que están ampliamente formadas por átomos ligeros (O, C, Si, Al) y sus estructuras frecuentemente no son compactas, sus densidades son bajas, por lo que sus módulos específicos (E/ρ) son atractivamente altos y por esta razón las fibras cerámicas o de vidrio se utilizan para formar compuestos.

Módulo específico: cerámicos comparados con metales

| Material | Módulo E (GPa) | Densidad ρ (g/cm ³) | Módulo específico E/ρ (GPa/g·cm ⁻³) |
|---|----------------|--------------------------------------|---|
| Acero | 210 | 7.8 | 27 |
| Aleaciones de aluminio | 70 | 2.7 | 26 |
| Alúmina, Al ₂ O ₃ | 390 | 3.9 | 100 |
| Sílice, SiO ₂ | 69 | 2.6 | 27 |
| Cemento | 45 | 2.4 | 19 |

• **Propiedades mecánicas:**

- Los materiales cerámicos son los sólidos más duros, por lo que se utilizan como abrasivos (**Al₂O₃**, **SiC**, **diamante...**)

Dureza normalizada de metales puros, aleaciones y cerámicos

| Metales puros | H/E | Aleaciones metálicas | H/E | Cerámicas | H/E |
|------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Cobre | 1.2×10^{-3} | Latón | 9×10^{-3} | Diamante | 1.5×10^{-1} |
| Aluminio | 1.5×10^{-3} | Dural (Al 4%Cu) | 1.5×10^{-2} | Alúmina | 4×10^{-2} |
| Níquel | 9×10^{-4} | Acero inoxidable | 6×10^{-3} | Zirconia | 6×10^{-2} |
| Hierro | 1×10^{-3} | Aceros de baja aleación | 1.5×10^{-2} | Carburo de silicio | 6×10^{-2} |
| Promedio metales | 1×10^{-3} | Promedio aleaciones | 1×10^{-2} | Promedio cerámicas | 8×10^{-2} |

- Al igual que la **dureza**, el **límite elástico** y la **resistencia a compresión** son altas, por lo que serán el **módulo de rotura** y la **resistencia al choque térmico**, más que el límite elástico, las propiedades críticas para el diseño.

| Material | Densidad g/cm ³ | Resistencia a la compresión | | Resistencia a la tensión | | Resistencia a la flexión | |
|---|-------------------------------|-----------------------------|-----|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| | | MPa | ksi | MPa | ksi | MPa | ksi |
| Al ₂ O ₃ (99 %) | 3,85 | 2585 | 375 | 207 | 30 | 345 | 50 |
| Si ₃ N ₄ (presionado en caliente) | 3,19 | 3450 | 500 | ... | ... | 690 | 100 |
| Si ₃ N ₄ (reacción de aglomeración) | 2,8 | 770 | 112 | ... | ... | 255 | 37 |
| SiC (sinterizado) | 3,1 | 3860 | 560 | 170 | 25 | 550 | 80 |
| ZrO ₂ , 9 % MgO (parcialmente estabilizado) | 5,5 | 1860 | 270 | ... | ... | 690 | 100 |

• **Fractura:**

- El mayor inconveniente de las cerámicas es su fragilidad (baja **tenacidad a fractura**).

- Los valores de K_{Ic} son aproximadamente **50** veces más bajos que en los buenos metales dúctiles.

| Material | K_{Ic} (MPa \sqrt{m}) |
|--|----------------------------|
| Circona parcialmente estabilizada | 9 |
| Porcelana eléctrica | 1 |
| Alúmina (Al ₂ O ₃) | 3-5 |
| Magnesia (MgO) | 3 |
| Cemento/hormigón, sin reforzar | 0,2 |
| Carburo de silicio (SiC) | 3 |
| Nitruro de silicio (Si ₃ N ₄) | 4-5 |
| Vidrio sódico (Na ₂ O-SiO ₂) | 0,7-0,8 |

- La presencia de fisuras (**producción, tensiones térmicas, corrosión, abrasión**) hace que la resistencia a tracción sea muy baja, estando condicionada por el tamaño de la grieta más larga.

$$\sigma_R = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi \cdot a_m}}$$

Cerámicos de altas prestaciones:

Resistencia a tracción alta: 200 MPa.

Tenacidad baja: 2 MPa·m^{1/2}

Tamaño típico de fisura: 30 – 50 mm.

Cerámicas vítreas (loza, ladrillos...):

Resistencia a tracción baja: 20 MPa.

Tamaño típico de fisura: milímetros.

Hormigones:

Resistencia a tracción muy baja: 2 MPa.

Tamaño típico de fisura: centímetros.

• Choque térmico:

- Es la fractura (parcial o completa) del material cerámico como resultado de un cambio de temperatura súbito (normalmente un enfriamiento brusco).
- El fallo puede producirse si se impide la expansión térmica uniforme o bien por los gradientes térmicos creados como consecuencia de una conductividad térmica finita.
- Deformación por contracción o dilatación térmica:

$$L = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \implies L - L_0 = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \implies \frac{L - L_0}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\epsilon = \alpha \cdot \Delta T \implies \sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \leq \sigma_R$$

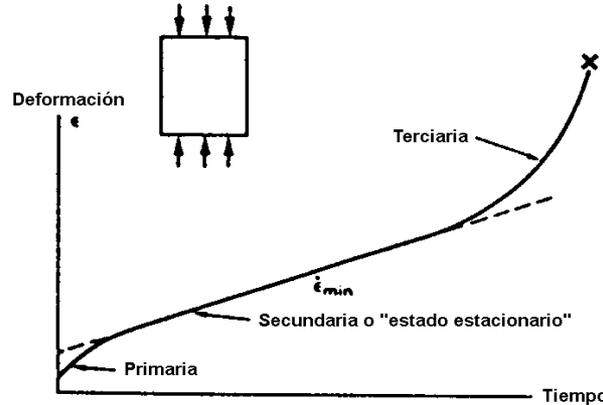
Vidrio ordinario: α es grande y ΔT pequeño (80°C).

Cerámicas de altas prestaciones: α es pequeño y σ_R grande ($\Delta T = 500^\circ\text{C}$).



• **Fluencia**

- Al igual que los metales, los cerámicos fluyen en caliente con curvas de fluencia análogas:



$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q/RT)$$

Ley de Weertman

- La alta temperatura de fusión de estos materiales (**superior a 2.000°C**) hace que el problema de la fluencia se presente para muy altas temperaturas de servicio ($T > 1/3 \cdot T_M$), caso de los refractarios por ejemplo.
- El **hielo** es un caso singular: este fenómeno es el responsable del deslizamiento de los glaciares y la expansión del casquete antártico.



15.10 ACTIVIDADES DE SEGUIMIENTO

En condiciones normales de operación, una válvula de material cerámico que trabaja a 250 °C se enfría repentinamente hasta temperatura ambiente por el paso de una corriente de agua. La válvula puede ser fabricada a partir de dos cerámicos distintos, denominados A y B, cuyas propiedades se recogen en la tabla adjunta. Seleccionar el material más adecuado para esta aplicación.

| | <u>A</u> | <u>B</u> |
|---|--------------------|--------------------|
| Módulo de elasticidad, E (GPa). | 120 | 350 |
| Coefficiente de dilatación, α (°C ⁻¹). | 2·10 ⁻⁶ | 9·10 ⁻⁶ |
| Tensión de rotura, σ_R (MPa). | 230 | 270 |
| Coefficiente de Poisson, ν . | 0,25 | 0,27 |
| Conductividad térmica a 50°C, K (W/mK). | 14 | 8 |