ÍNDICE

8.1. Capacidad calorífica

- Se define la **capacidad calorífica** o capacidad térmica molar como la energía necesaria para hacer variar en **1 K** la temperatura de un **mol** de material.

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

- El **calor específico** se define como la energía necesaria para hacer variar en **1 K** la temperatura de un **gramo** del material.
- La relación entre Ce y Cp viene dada por:

$$c = \frac{q}{m\Delta T}$$

$$C_e = C_p / P_{mol}$$

Valores de calor específico para distintos materiales.

Material	c_p [J/kg·K]
Metals[a]	
Aluminum	900
Copper	385
Gold	129
Iron (α)	444
Lead	159
Nickel	444
Silver	237
Titanium	523
Tungsten	133
Ceramics[a, b]	
Al_2O_3	160
MgO	457
SiC	344
Carbon (diamond)	519
Carbon (graphite)	711
Polymers[a]	
Nylon 66	1260–2090
Phenolic	1460–1670
Polyethylene (high density)	1920–2300
Polypropylene	1880
Polytetraflouroethylene (PTFE)	1050

Hay dos modos de medir la capacidad calorífica (o el calor específico).

Uno, manteniendo el volumen constante, $C_v(c_v)$, y el otro, manteniendo constante la presión, $C_p(c_p)$.

En el caso de **materiales para ingeniería** generalmente se trabaja a **presión constante** y con magnitudes por **unidad de masa**. *Calor específico*.

Problema: Estímese la cantidad de calor (en J) requerida para elevar la temperatura desde temperatura ambiente (25 °C) hasta 100 °C en el caso de una masa de 2 kg de hierro- α.
Respuesta: 66,6x10³ J

Problema: Estímese la cantidad de calor (en J) requerida para elevar la temperatura desde temperatura ambiente (25 °C) hasta 100 °C en el caso de una masa de 2 kg de hierro- α.
Respuesta: 66,6x10^3 J

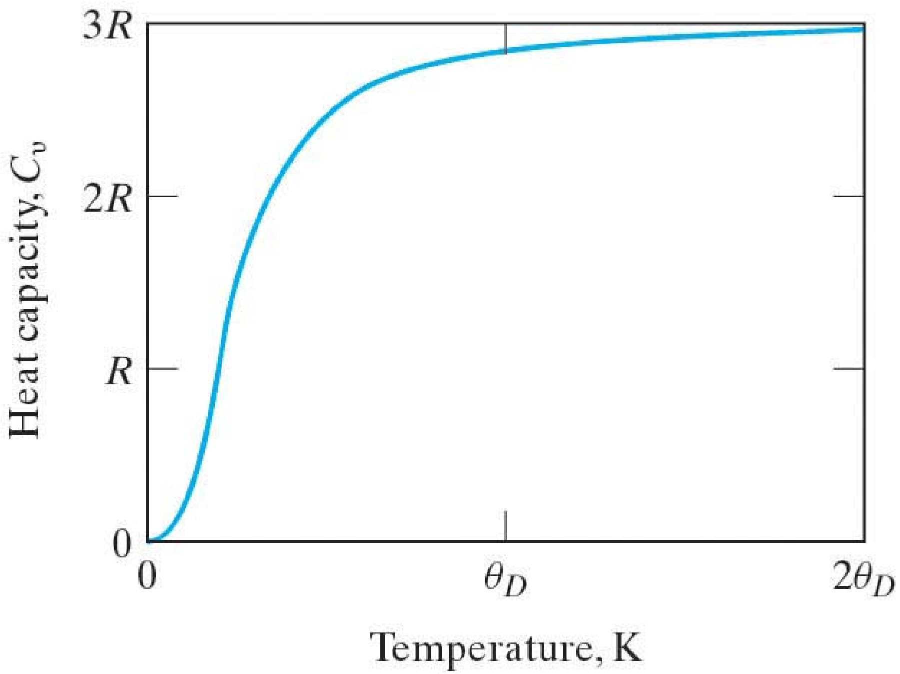
$$q = c\,m\,\Delta T$$

$$= (444\ J/kg \cdot K)(2\ kg)(100-25)\,°C$$

$$= (444\ J/kg \cdot K)(2\ kg)(75\ K)$$

$$= 66.6 \times 10^3\ J = \underline{\underline{66.6\ kJ}}$$

8.1. Capacidad calorífica



Dependencia con la temperatura de la capacidad calorífica a volumen constante, C_v. El valor de C_v aumenta bruscamente desde una temperatura próxima a 0 K, y por encima de la temperatura de Debye *(θ_D)* alcanza un valor asintótico de aproximadamente 3*R.*

- A temperaturas muy bajas, C_v aumenta bruscamente desde cero a 0K según $C_v = AT^3$.
- Por encima de la temperatura de Debye *(θ_D)*, el valor de C_v se estabiliza a aproximadamente 3*R por encima de 200K,* siendo *R* la constante universal de los gases.
- Debido a que θ_D es inferior a la temperatura ambiente para muchos sólidos, y $C_p \approx C_v$, se dispone de una útil regla empírica para conocer la capacidad calorífica de muchos materiales para ingeniería.
- Los valores de C_p y C_v son característicos de la composición del material, por lo que se consideran invariantes con la estructura policristalina.
- No se ven afectados por cambios en el tamaño de grano, deformación plástica (acritud), defectos en los cristales (dislocaciones), etc

Problema: Una casa diseñada para calentamiento solar pasivo posee en su interior una gran cantidad de ladrillos con la finalidad de absorber calor. Cada ladrillo pesa 2.0 kg y posee un calor específico de 850 J/kg*K. ¿Cuántos ladrillos serán necesarios para absorber un calor de 5.0 x 10^4 kJ mediante un incremento de temperatura de 10°C? **Respuesta: 2940 ladrillos**

Problema: Una casa diseñada para calentamiento solar pasivo posee en su interior una gran cantidad de ladrillos con la finalidad de absorber calor. Cada ladrillo pesa 2.0 kg y posee un calor específico de 850 J/kg*K. ¿Cuántos ladrillos serán necesarios para absorber un calor de 5.0 x 10^4 kJ mediante un incremento de temperatura de 10°C? **Respuesta: 2940 ladrillos**

$$q = c\,m\,\Delta T \quad \text{or} \quad m = \frac{q}{c\,\Delta T} \qquad (\text{and } \Delta T = 10^\circ C = 10\,K)$$

$$m_{brickwork} = \frac{5.0 \times 10^4 \times 10^3\,J}{(850\,J/kg\cdot K)(10\,K)} = 5880\,kg$$

$$\therefore\; m_{bricks} = \frac{5880\,kg}{2\,kg/brick} = \underline{\underline{2940\ bricks}}$$

8.2. Dilatación térmica

Valores del coeficiente de dilatación lineal para distintos materiales.

Material	α [mm/(mm·°C) × 10^6] Temperature = 27°C (300 K)	527°C (800 K)	0–1,000°C
Metals[a]			
Aluminum	23.2	33.8	
Copper	16.8	20.0	
Gold	14.1	16.5	
Nickel	12.7	16.8	
Silver	19.2	23.4	
Tungsten	4.5	4.8	
Ceramics and glasses[a, b]			
Mullite ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)			5.3
Porcelain			6.0
Fireclay refractory			5.5
Al_2O_3			8.8
Spinel ($MgO \cdot Al_2O_3$)			7.6
MgO			13.5
UO_2			10.0
ZrO_2 (stabilized)			10.0
SiC			4.7
Silica glass			0.5
Soda–lime–silica glass			9.0
Polymers[a]			
Nylon 66	30–31		
Phenolic	30–45		
Polyethylene (high-density)	149–301		
Polypropylene	68–104		
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	99		

Un aumento de la temperatura origina una mayor vibración térmica de los átomos del material y un aumento de la distancia media de separación entre átomos adyacentes.

El **cambio de dimensión dL por unidad de longitud** y por **grado centígrado** (o absoluto) **de temperatura** está dado por la expresión:

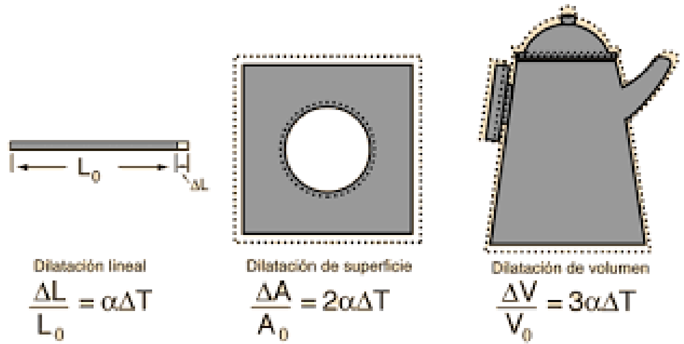
$$\alpha = dL / L\, dT$$

donde α se define como el **coeficiente de expansión térmica** o **coeficiente de dilatación**.

Su conocimiento permite determinar los cambios dimensionales que sufre el material como consecuencia de un cambio en su temperatura.

$$L_T = L_{T0}\,(1 + a\,[T - T_0])$$

Problema: Un tubo de mullita de 0.1 m de longitud, para un homo, se calienta desde temperatura ambiente (25 °C hasta 1000°C. Suponiendo que el tubo no se halla sometido a compresión, calcúlese el incremento de longitud que provoca dicho calentamiento. **Respuesta: 0,517x10^{-3} m**



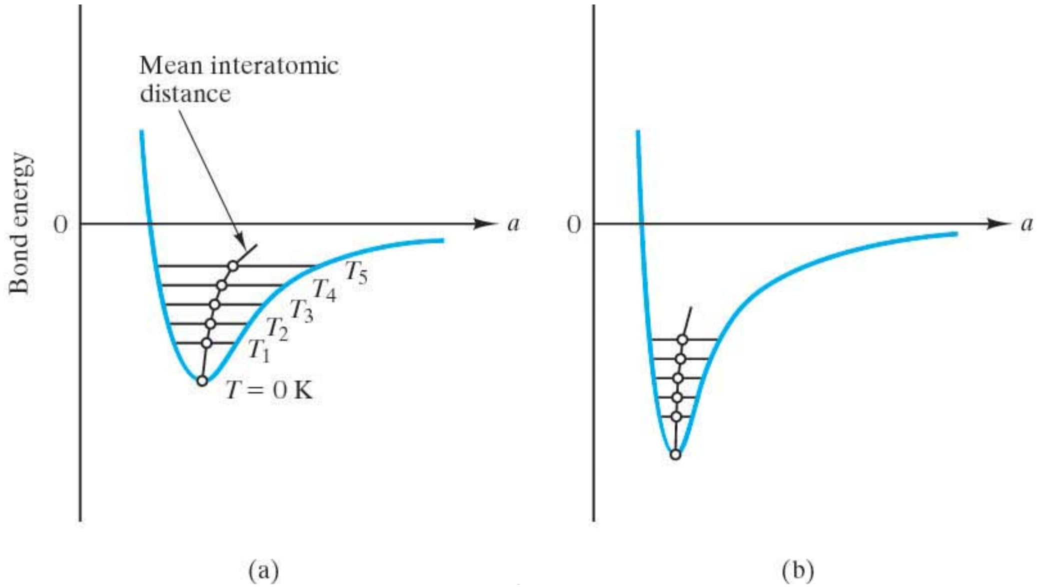
Problema: Un tubo de mullita de 0.1 m de longitud, para un homo, se calienta desde temperatura ambiente (25 °C hasta 1000°C. Suponiendo que el tubo no se halla sometido a compresión, calcúlese el incremento de longitud que provoca dicho calentamiento. **Respuesta: 0,517x10^{-3} m**

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$$

$$= [5.3 \times 10^{-6} mm/(mm \cdot °C)](0.1\ m)(1000-25)°C$$

$$= 0.517 \times 10^{-3} m = \underline{\underline{0.517\ mm}}$$

8.2. Dilatación térmica

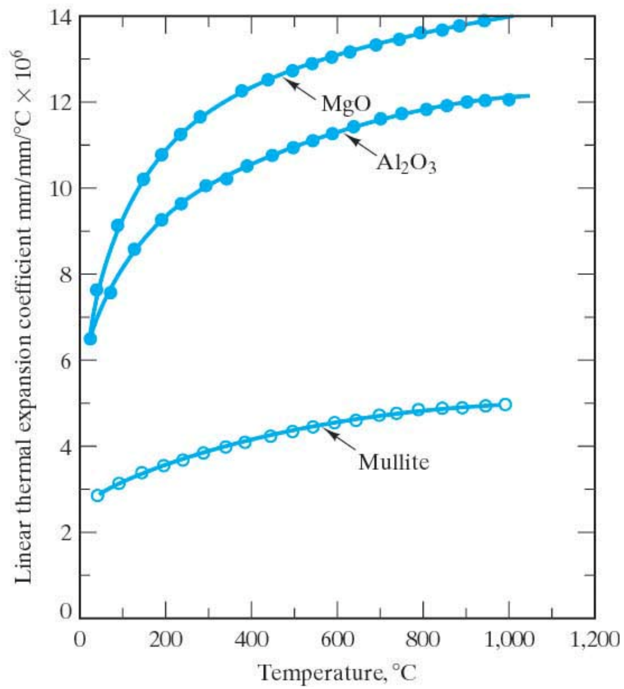


Representación de la energía del enlace atómico en función de la distancia interatómica para (a) un sólido con un enlace débil y (b) un sólido con un enlace fuerte. La dilatación térmica es el resultado de una mayor distancia interatómica a medida que aumenta la temperatura. El efecto es mayor en el caso de la curva de energía menos simétrica correspondiente al sólido con el enlace más débil. La temperatura de fusión y el módulo elástico aumentan al hacerlo la fortaleza del enlace.

Sólidos con enlace débil	**Sólidos con enlace fuerte**
Baja temperatura de fusión	Alta temperatura de fusión
Bajo módulo elástico	Alto módulo elástico
Alto coeficiente de dilatación	Bajo coeficiente de dilatación

El coeficiente de dilatación **aumenta** conforme se **reduce** la resistencia de los enlaces atómicos en el sólido.

Los valores **mínimos** del coeficiente de dilatación corresponden a los **materiales cerámicos** con mayor punto de fusión y los máximos a los materiales poliméricos.



Coeficiente de dilatación lineal en **función de la temperatura** para tres óxidos cerámicos

8.2. Dilatación térmica

Problema. Se fabrican raíles de tren, de 15 metros de longitud a temperatura ambiente de 18°C, con un acero del 0.25% C, que tiene un coeficiente de dilatación térmico lineal de $12.5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}. Está previsto que pueda sufrir temperaturas de -22°C hasta 60°C.

a) ¿Cuál será el espacio máximo que puede haber entre raíles?
b) ¿Cuál será el espacio que debe preverse para no introducir tensiones térmicas en el material?

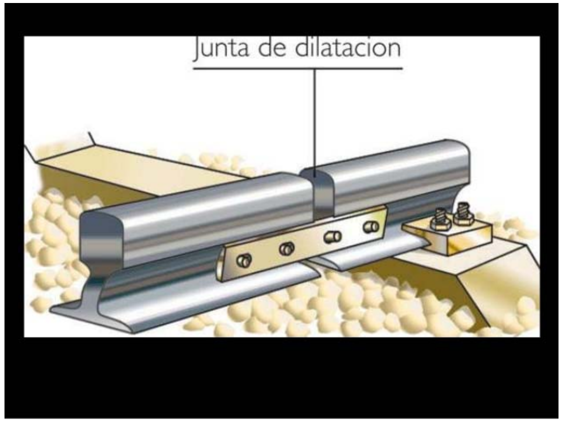
El máximo espacio será el determinado por las temperaturas extremas, es decir con un $\Delta T = 60 + 22 = 82$ K.

Considerando:

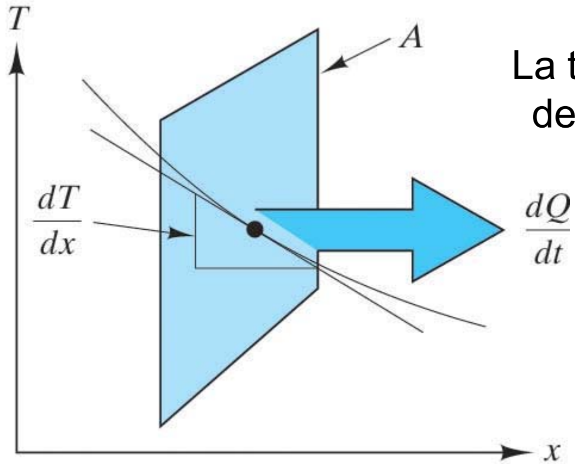
$$\alpha = \frac{\Delta L / L}{\Delta T} \quad \Rightarrow \quad \Delta L = \alpha\ \Delta T\ L = 12{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 82 \cdot 15 = 0{,}01538\ \mathrm{m} = 15{,}38\ \mathrm{mm}$$

Para que no se introduzcan tensiones térmicas en el material, el espacio entre railes será:

$$\Delta L = \alpha\ \Delta T\ L = 12{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot (60 - 18) \cdot 15 = 0{,}00750\ \mathrm{m} = 7{,}50\ \mathrm{mm}$$



8.3. Conductividad térmica



La transferencia de calor viene definida por la ley de Fourier

El análisis matemático de la conducción de calor en sólidos es análogo al de la difusión. El análogo de la difusividad, *D* , es la **conductividad térmica,** *k*, definida mediante la **ley de Fourier:**

$$k = -\frac{(dQ/dt)}{A(dT/dx)}$$

donde *dQ/dt* es la velocidad de transferencia de calor a través de un área *A* , debido a un gradiente de temperatura *dT/dx.* Las unidades de *k* son **J/(s-m** - K).

En su forma incremental,

$$k = \frac{\frac{-\Delta Q}{\Delta t}}{A\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)}$$

resulta adecuada para describir el flujo de calor a través de las paredes refractarias en hornos para alta temperatura.

8.3. Conductividad térmica

Valores de conductividad térmica para distintos materiales.

Material	Temperature =27°C (300 K)	100°C	527°C (800 K)	1,000°C
	k [J/(s · m · K)]			
Metals[a]				
Aluminum	237		220	
Copper	398		371	
Gold	315		292	
Iron	80		43	
Nickel	91		67	
Silver	427		389	
Titanium	22		20	
Tungsten	178		128	
Ceramics and glasses[a, b]				
Mullite ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$)		5.9		3.8
Porcelain		1.7		1.9
Fireclay refractory		1.1		1.5
Al_2O_3		30.0		6.3
Spinel ($MgO{\cdot}Al_2O_3$)		15.0		5.9
MgO		38.0		7.1
ZrO_2 (stabilized)		2.0		2.3
TiC		25.0		5.9
Silica glass		2.0		2.5
Soda–lime–silica glass		1.7		—
Polymers[a]				
Nylon 66	2.9			
Phenolic	0.17–0.52			
Polyethylene (high-density)	0.33			
Polypropylene	2.1–2.4			
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.24			

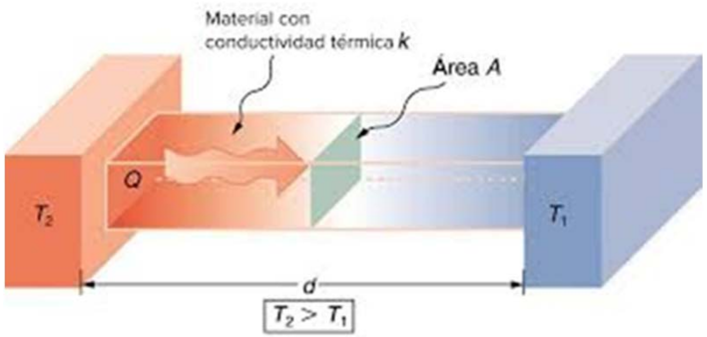
Source: Data from [a]J. F. Shackelford and W. Alexander, *The CRC Materials Science and Engineering Handbook*, 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2001, and [b]W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to Ceramics*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., NY, 1976.

Problema: Calcúlese la velocidad de transferencia de calor (en J/m^2 * s) en estado estacionario a través de una chapa de cobre de 10 mm de espesor, si existe una diferencia de temperatura de 50 °C, desde 550 °C a 500 °C. **Respuesta: 1,86x10^6 J/m^2*s**

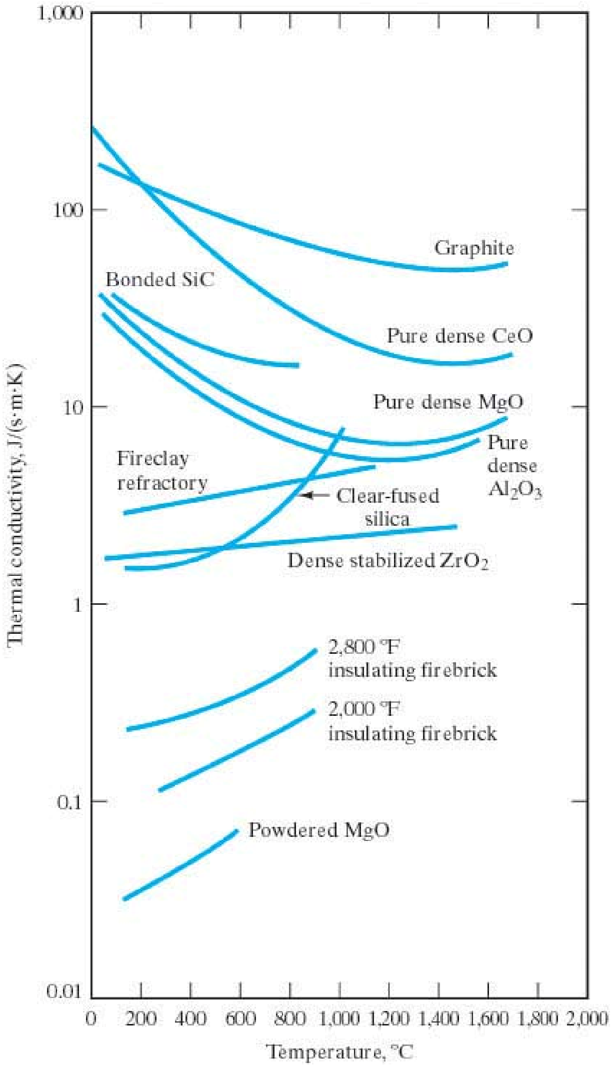
$$(\Delta Q/\Delta t)/A = -k\,(\Delta T/\Delta x)$$

$$= -(371\ J/s{\cdot}m{\cdot}K)\,([500-550]^\circ C/[10\times10^{-3}\,m])$$

$$= \underline{\underline{1.86\times10^{6}\ J/m^2 s}}$$



8.3. Conductividad térmica



Conductividad térmica de diferentes cerámicos en función de la temperatura.

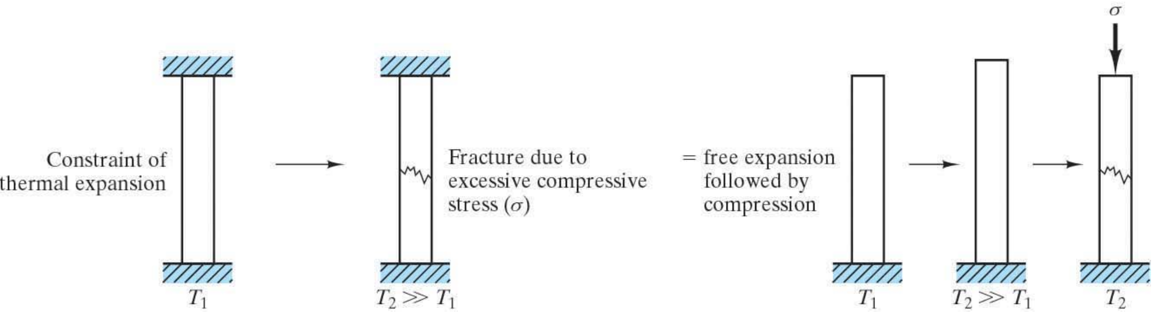
- En los **metales** los portadores de energía térmica en los metales son los **electrones** (movilidad)
- En **cerámicas y polímeros**, los electrones no son libres, por lo que su contribución a la conductividad térmica, y también a la conductividad eléctrica, es prácticamente nula salvo a muy altas temperaturas.
- La conductividad térmica en los no-metales puede estimarse mediante la relación:

k = Cp (ρ · E)1/2 d

Donde: *E* Módulo de elasticidad, ρ densidad, C_p Calor específico, *d* camino medio de la **vibración térmica**.
- El valor *d* del camino medio de la vibración aumenta con la temperatura del material, lo que justifica el aumento observado de conductividad térmica cuando el material se calienta.
- **La conductividad aumenta al aumentar la temperatura, el módulo E y la densidad del material.**
- Los sólidos cristalinos presentan mayor conductividad que si son amorfos.
- **La conducción calorífica en los no-metales se realiza fundamentalmente mediante vibraciones elásticas de la red.**
- La presencia de porosidad reduce notablemente la densidad del material y por lo tanto su conductividad térmica, ya que **el aire o gas en los poros atenúa o amortigua la vibración**.

8.4. Choque térmico

El empleo de materiales frágiles a altas temperaturas, da lugar a un problema especial en ingeniería, denominado **choque térmico**. Puede definirse como la fractura del material como resultado de un cambio de temperatura (normalmente un enfriamiento brusco).

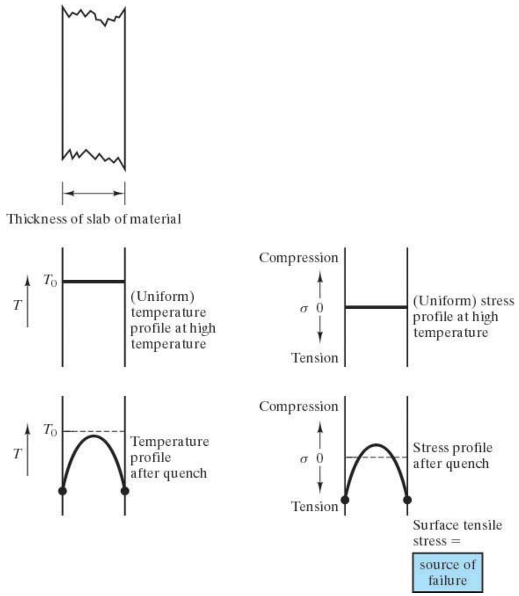


Choque térmico debido al hecho de impedir la dilatación térmica del material. El proceso es equivalente a otro en el que se permitiera al material dilatar libremente para devolverlo seguidamente a su dimensión inicial mediante la aplicación de una compresión mecánica.

El mecanismo del **choque térmico** involucra a la **dilatación térmica** y a la **conductividad térmica**. El choque térmico es consecuencia de los valores de esas propiedades desde dos puntos de vista.

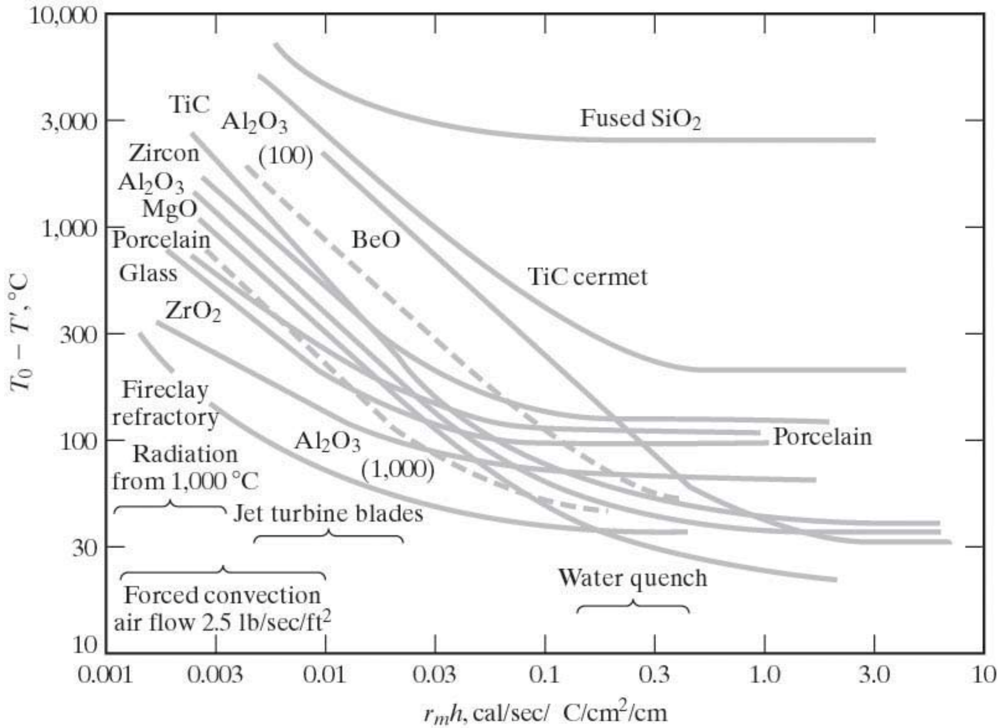
En primer lugar, puede producirse un fallo debido a tensiones si se impide la expansión térmica uniforme.

En segundo lugar, los cambios bruscos de temperatura producen temporalmente gradientes de temperatura en el material, que originan tensiones residuales internas.



Choque térmico, resultado de los gradientes de temperatura debidos a una conductividad térmica finita. El enfriamiento rápido origina tensiones superficiales de tracción.

8.4. Choque térmico



Enfriamientos bruscos que dan lugar al fallo por choque térmico. Se ha dibujado la caída de temperatura necesaria para producir fractura *(T_0 – T')* en función del parámetro de transferencia de calor *($r_m h$)*. Son más importantes los intervalos correspondientes a determinados tipos de temple que los valores concretos de $r_m h$ (por ejemplo, el temple en agua corresponde a valores de $r_m h$ en torno a 0.2 y 0.3).

La capacidad de un material para resistir un cambio de temperatura dado depende de una combinación de coeficiente de dilatación, conductividad térmica, geometría de la pieza y fragilidad inherente del material.

Un índice para estimar la resistencia al choque térmico puede ser el siguiente:

$Ir = k*R / \alpha*E*Ce$

donde

- *k,* Cond. Térmica,
- *R,* Carga de rotura,
- α, coef. Dilatación,
- *E,* Modulo,
- *Ce,* Calor específico

8.4. Choque térmico

Problema 1. Una pieza de acero esmaltado, en el que la unión entre el esmalte y el acero es rígida a través de una capa de óxido, es calentada desde los 25ºC, donde no presenta tensiones, hasta los 85ºC.

a)¿Qué tensiones se generarán en el esmalte?

b) ¿A qué temperatura se fracturará o agrietará el esmalte?

Material	*α x 10^{-6} (cm/cm·K)*	*E (GPa)*	*Le (MPa)*
Acero	*12.5*	*210*	*380*
Esmalte	*0.55*	*75*	*110*

a) En el esmalte se generarán tensiones debidas a la diferencia de dilatación entre los dos materiales, es decir: $\varepsilon=\alpha\Delta T$

ε_{acero} *= 12,5 · 10^{-6} cm/cm·K · 60 K = 7,5 · 10^{-4}*

$\varepsilon_{esmalte}$ *= 0,55 · 10^{-6} cm/cm·K · 60 K = 3,3 · 10^{-5}*

$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{acero} - \varepsilon_{esmalte}$ = 7,5 · 10^{-4} - 3,3 · 10^{-5} = 7,17 · 10^{-4}

y las tensiones generadas en el esmalte por esta deformación serán:

$\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon$ = 75 GPa · 7,17 · 10^{-4} = 53,8 MPa

b) El material se fracturará cuando las tensiones superen su resistencia a la rotura, es decir, 110 MPa, por tanto:

$$\Delta T = \frac{\Delta\varepsilon}{\alpha_{acero} - \alpha_{esmalte}}$$

siendo $\Delta\varepsilon$, $$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{110\ \mathrm{MPa}}{75\ \mathrm{GPa}} = 1{,}467 \cdot 10^{-3}$$

por lo que la temperatura será:

$$T = 25 + \Delta T = 25 + \frac{\Delta\varepsilon}{\alpha_{acero} - \alpha_{esmalte}} = 25 + \frac{1{,}467 \cdot 10^{-3}}{12{,}5 \cdot 10^{-6} - 0{,}55 \cdot 10^{-6}} =$$
$$= 25 + 122{,}76°C = 147{,}76°C = 420{,}76K$$

http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm11/ejercicios11_3.html