PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

- A 0 K los átomos tienen una energía mínima.
- Al aplicarles energía, vibran con cierta amplitud.
- La energía se propaga como una onda elástica conocida como fonón.
- Su energía puede ser dada como:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = hv$$

CAPACIDAD DE CALOR Y CALOR ESPECÍFICO

Propiedades térmicas → <u>Fonones</u>: Ondas elásticas producidas por vibraciones atómicas

- E
- λ
- ν

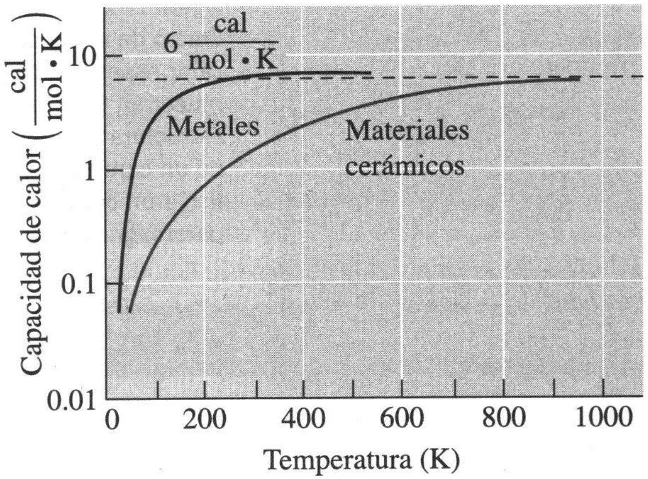
$$E = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

CAPACIDAD DE CALOR Ó CALOR ESPECÍFICO.- Energía requerida para cambiar un grado en la temperatura de un material.

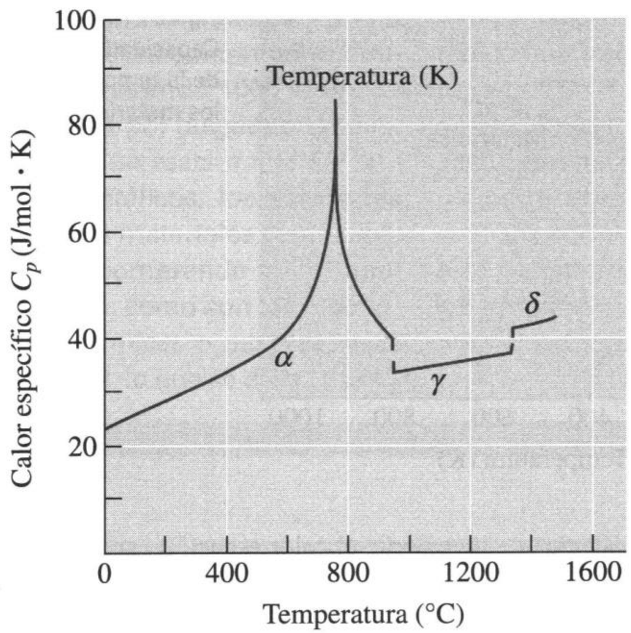
CAPACIDAD DE CALOR.- Energía necesaria para elevar la temperatura de un mol de un material en un grado. (C_p o C_v)

CALOR ESPECÍFICO.- Energía necesaria para incrementar la temperatura de un gramo de un material en 1°C.

A T'_s $\uparrow$ $$C_p = 3R \simeq 6 \frac{\text{cal}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$ R = 1.987 cal/mol



Capacidad de calor para metales y cerámicos ψ T.



Efecto de T sobre C_p de Fe, mostrando cambios en estructura cristalina como en comportamiento ferro a paramagnético.

$$\text{Calor específico} = C_p = \frac{\text{Capacidad de calor}}{\text{Peso atómico}}$$

TABLA 21-1 ■ ***Calor específico de materiales seleccionados a 27 °C***

Material	Calor específico $\left(\frac{cal}{g \cdot K}\right)$	Material	Calor específico $\left(\frac{cal}{g \cdot K}\right)$
Metales:		Materiales cerámicos:	
Al	0.215	Al_2O_3	0.200
Cu	0.092	Diamante	0.124
B	0.245	SiC	0.250
Fe	0.106	Si_3N_4	0.170
Pb	0.038	SiO_2 (sílice)	0.265
Mg	0.243	Polímeros:	
Ni	0.106	Polietileno de alta densidad	0.440
Si	0.168	Polietileno de baja densidad	0.550
Ti	0.125	Nylon 6,6	0.400
W	0.032	Poliestireno	0.280
Zn	0.093	Otros:	
		Agua	1.000
		Nitrógeno	0.249

Nota: $1 \frac{cal}{g \cdot K} = 4184 \frac{J}{kg \cdot K}$

EJEMPLO 21-1 *Calor específico del tungsteno*

¿Cuánto calor debe aplicarse a 250 g de tungsteno para elevar su temperatura de 25° a 650 °C?

SOLUCIÓN

El calor específico del tungsteno es de $0.032\ \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$. Entonces:

$$\begin{aligned}\text{Calor requerido} &= (\text{calor específico})\,(\text{masa})\,(\Delta T)\\ &= (0.032\ \text{cal/g} \cdot \text{K})(250\ \text{g})(650 - 25)\\ &= 5000\ \text{cal}\end{aligned}$$

Si no hay pérdidas deberán suministrarse 5000 cal (es decir, 20 920 J) al tungsteno. Para calentar el metal se pueden utilizar una diversidad de procesos. Podemos utilizar un soplete de gas, podemos colocar el tungsteno en una bobina de inducción para inducir corrientes parásitas o de eddy, podemos hacer pasar una corriente eléctrica a través del metal o podemos colocar el metal en un horno calentado por resistores de SiC.

EJEMPLO 21-2 *Calor específico del niobio*

Suponga que 50 g de niobio tienen un incremento de temperatura de 75 °C cuando se calienta durante un cierto periodo. Estime el calor específico y determine el calor en términos de las calorías requeridas.

SOLUCIÓN

El peso atómico del niobio es de 92.91 g/mol. Podemos utilizar la ecuación 21-3 para estimar el calor requerido para elevar la temperatura de un gramo en 1°C:

$$C_P \approx \frac{6}{92.91} = 0.0646\ \text{cal/g} \cdot {}^\circ\text{C}$$

Entonces el calor requerido total es:

$$\text{Calor} = \left(0.0646\ \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot {}^\circ\text{C}}\right)(50\ \text{g})(75\ {}^\circ\text{C}) = 242\ \text{cal}$$

EXPANSIÓN TÉRMICA

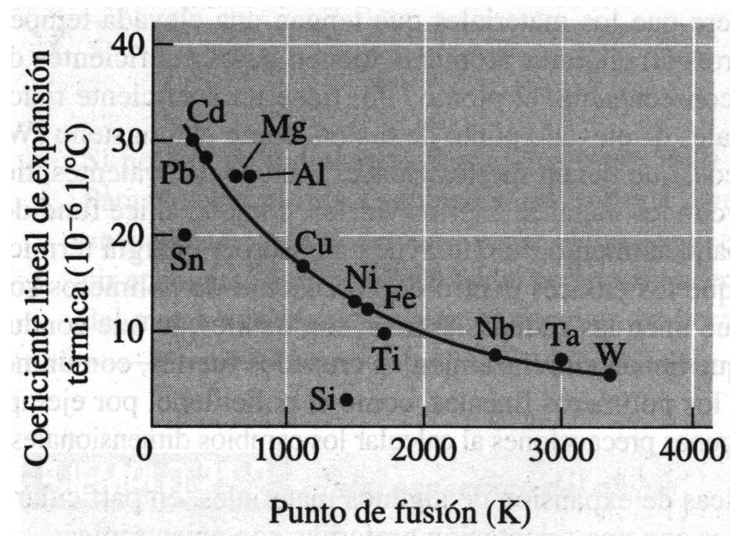
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA LINEAL.- Cambio Δl en dimensiones del material, por unidad de longitud.

$$\alpha = \frac{l_f - l_0}{l_0(T_f - T_0)} = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} = \frac{\varepsilon}{\Delta T}$$

donde: T_o y T_f = T's inicial y final
l_o y l_f = dimensiones inicial y final
ε = deformación

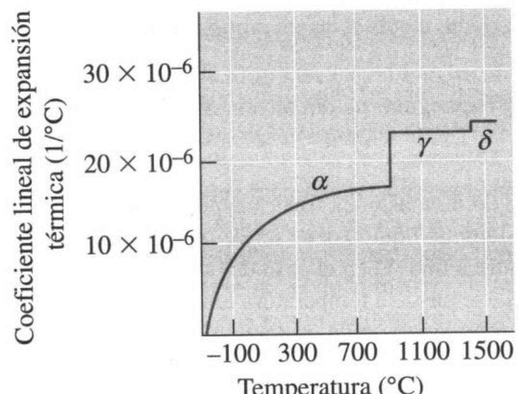
TABLA 21-2 ■ *Coeficiente lineal de expansión térmica para materiales seleccionados a la temperatura ambiente*

Material	Coeficiente lineal de expansión térmica ($\times 10^{-6}$ 1/0 °C)
Al	25.0
Cu	16.6
Fe	12.0
Ni	13.0
Pb	29.0
Si	3.0
W	4.5
Acero 1020	12.0
Aleación de aluminio 3003	23.2
Fundición de hierro gris	12.0
Invar (Fe-36% Ni)	1.54
Acero inoxidable	17.3
Latón amarillo	18.9
Resina epóxica	55.0
Nylon 6,6	80.0
Nylon 6,6–33% fibra de vidrio	20.0
Polietileno	100.0
Polietileno–30% fibra de vidrio	48.0
Poliestireno	70.0
Al_2O_3	6.7
Sílice fundido	0.55
ZrO_2 parcialmente estabilizado	10.6
SiC	4.3
Si_3N_4	3.3
Vidrio de sosa y cal	9.0

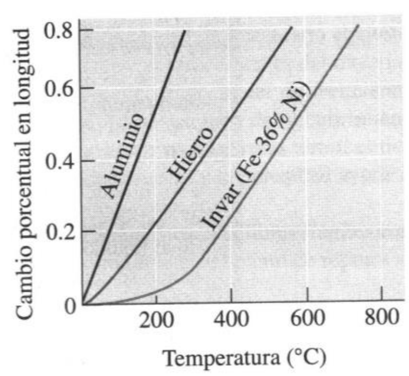


Precauciones al calcular cambios dimensionales en materiales:

1.- Las características de expansión de algunos materiales (cristales individuales o con orientación preferida) son anisotrópicas.
2.- Materiales alotrópicos sufren cambios abruptos dimensionales en las transformaciones de fase. Ej. agrietamiento en refractarios ó grietas de templado en aceros.



3.- α cambia continuamente con T. Es común reportarla como una constante en un rango particular de temperatura.
4.- La interacción del material con campos eléctricos y magnéticos puede impedir la expansión normal, hasta alcanzar T's > TCurie 200°C.



EJEMPLO 21-4 *Diseño de un molde para un proceso de colado*

Diseñe las dimensiones de un molde que será utilizado para producir una pieza vaciada de aluminio de forma rectangular de dimensiones, a 25 °C, de $25 \times 25 \times 3$ cm.

SOLUCIÓN

Para producir un colado de dimensiones finales específicas, la cavidad del molde en el cual se va a vaciar el aluminio líquido debe ser de mayor tamaño. Una vez solidificado el líquido, lo cual ocurre a 660 °C en el caso del aluminio puro, el material vaciado sólido se contrae al enfriarse hasta la temperatura ambiente. Si calculamos la contracción esperada, podemos fabricar el molde original utilizado para producir esta cavidad con el tamaño más grande requerido.

El coeficiente lineal de expansión térmica para el aluminio es 25×10^{-6} 1/°C. El cambio en la temperatura desde la temperatura de solidificación hasta los 25 °C es $660 - 25 = 635$ °C. El cambio en cualquiera de las dimensiones está dado por:

$$\Delta l = l_0 - l_f = \alpha l_0 \Delta T$$

Para las dimensiones de 25 cm de lado, $l_f = 25$ cm. Deseamos determinar l_0:

$$l_0 - 25 = (25 \times 10^{-6})\,(l_0)\,(635)$$
$$l_0 - 25 = 0.15875 l_0$$
$$0.984 l_0 = 25$$
$$l_0 = 25.40 \text{ cm}$$

Para la dimensión de 3 cm, $l_f = 3$ cm.

$$l_0 - 3 = (25 \times 10^{-6})\,(l_0)\,(635)$$
$$l_0 - 3 = 0.015875 l_0$$
$$0.984 l_0 = 3$$
$$l_0 = 3.05 \text{ cm}$$

Si diseñamos el molde con dimensiones $25.40 \times 25.40 \times 3.05$ cm, la colada se contraerá a las dimensiones requeridas.

ESFUERZOS TÉRMICOS.- Esfuerzos introducidos en un material a causa de diferencias en la cantidad de expansión o de contracción debidas a un cambio en T.

$$\sigma_{\text{térmica}} = \alpha E \Delta T$$

EJEMPLO 21-5 ***Diseño de un recubrimiento protector***

Se debe aplicar un esmalte cerámico a una placa de acero 1020. El material cerámico tiene una resistencia a la fractura de 4000 psi, un módulo de elasticidad de 15×10^6 psi y un coeficiente de expansión térmica igual a $10 \times 10^{-6} \frac{1}{°C}$. Determine el cambio máximo en la temperatura que se puede permitir sin que se agriete el material cerámico.

SOLUCIÓN

Dado que el esmalte queda unido al acero 1020, esencialmente queda limitado. Si se pudiera calentar sólo el esmalte (quedando el acero a una temperatura constante), el cambio máximo de temperatura sería:

$$\sigma_{\text{térmica}} = \alpha E \Delta T = \sigma_{\text{fractura}}$$

$$\left(10 \times 10^{-6} \frac{1}{°C}\right)(15 \times 10^6 \text{ psi})\, \Delta T = 4000 \text{ psi}$$

$$\Delta T = 26.7 \text{ °C}$$

Sin embargo, también se expande el acero. Su coeficiente de expansión térmica (tabla 21-2) es igual a $12 \times 10^{-6} \frac{1}{°C}$ y su módulo de elasticidad es de 30×10^6 psi. Dado que el acero se expande más que el esmalte, se introduce todavía un esfuerzo en el esmalte. El coeficiente de expansión neto es

$$\Delta\alpha = 12 \times 10^{-6} - 10 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-6} \text{ 1/°C:}$$

$$\sigma = (2 \times 10^{-6})(15 \times 10^{-6})\, \Delta T = 4000$$

$$\Delta T = 133 \text{ °C}$$

A fin de permitir mayores variaciones en la temperatura, podríamos seleccionar un esmalte con un coeficiente de expansión térmica más elevado, un esmalte que tenga un módulo de elasticidad inferior (de manera que se permitan deformaciones mayores antes de que el esfuerzo llegue al esfuerzo de fractura), o un esmalte que tenga una resistencia mayor.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, *K*

Medida de la velocidad de transferencia de calor a través de un material. Se relaciona con el calor *Q* que se transfiere cada segundo a través de un plano de área *A*, cuando existe un gradiente de temperatura $\Delta T/\Delta x$.

$$\frac{Q}{A} = K\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

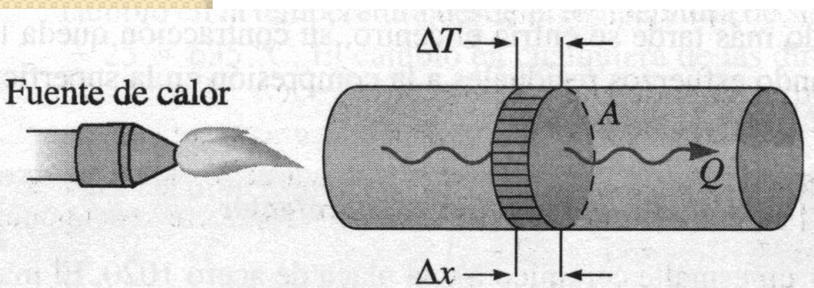


TABLA 21-3 ■ ***Valores comunes de la conductividad térmica a la temperatura ambiente de materiales seleccionados***

Material	Conductividad térmica $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Material	Conductividad térmica $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Metales puros:		Materiales cerámicos:	
Ag	430		
Al	238	Al_2O_3	16–40
Cu	400	Carbono (diamante)	2000
Fe	79	Carbono (grafito)	335
Mg	100	Arcilla refractaria	0.26
Ni	90		
Pb	35	Carburo de silicio	hasta 270
Si	150	AlN	hasta 270
		Si_3N_4	hasta 150
Ti	22	Vidrio de cal y sosa	0.96–1.7
W	171	Sílice vítreo	1.4
Zn	117	Vidrio Vycor™	12.5
Zr	23	ZrO_2	4.2
Aleaciones:		Polímeros:	
Acero 1020	100	Nylon–6,6	0.25
Aleación aluminio 3003	280	Polietileno	0.33
Acero inoxidable 304	30	Poliimida	0.21
Cementita	50	Poliestireno	0.13
		Espuma de poliestireno	0.029
Cu-30% Ni	50	Teflón	0.25
Ferrita	75		
Fundición de hierro gris	79.5		
Latón amarillo	221		

Nota: $1\ cal/cm \cdot s \cdot K = 418.4\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

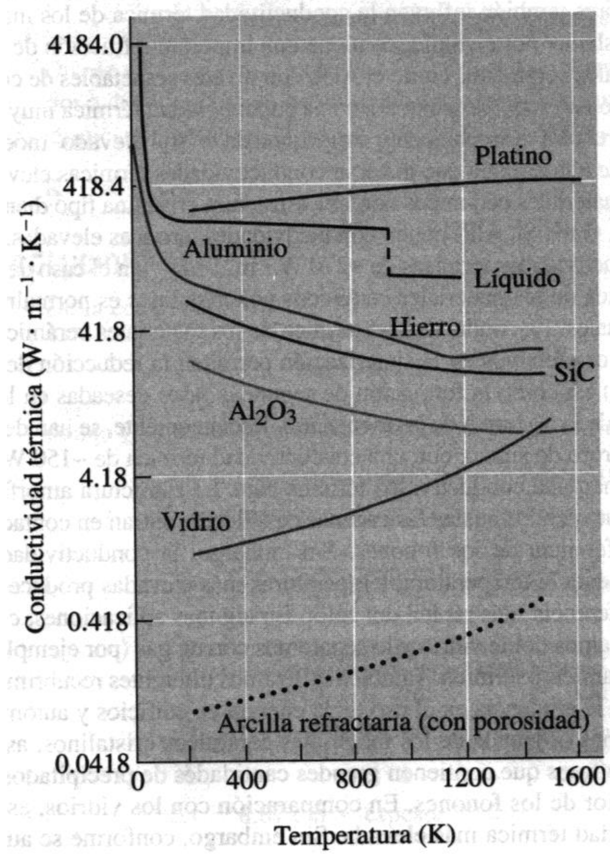
METALES

Banda de conducción, parcialmente llena ➡ e'$_s$ necesitan poca excitación térmica para moverse y contribuir a t.c.

Relación entre conductividad térmica y eléctrica:

$$\frac{K}{\sigma T} = L = 5.5 \times 10^{-9} \frac{\text{cal} \cdot \text{ohm}}{\text{s} \cdot \text{K}^2},$$

L = constante de Lorentz



Al aumentar T → K

<u>Se contraponen</u>:

- Aumenta energía de e'$_s$ creando más "portadores" y aumentando la contribución de la vibración de la red cristalina ∴ K ↑
- Una vibración mayor de la red cristalina dispersa e'$_s$, reduciendo su movilidad ∴ K ↓

MATERIALES CERÁMICOS

Baja K vs. metales → E_g muy grande ∴ Transf. De Calor debida a vibraciones de la red cristalina (fonones)

POROSIDAD

AlN
SiC
BeO
BP
GaN
Si
AlP

} Buena K

- Estructura tipo diamante (empaquetamiento compacto)
- E alto

→ Fonones con alta energía

AlN y SiC → Buenos conductores térmicos y buenos aislantes eléctricos → Sustratos electrónicos, disipadores de calor

EJEMPLO 21-6 *Diseño de un vidrio para ventanas*

Diseñe una ventana de vidrio de 4×4 pies que separa una habitación a 25 °C, del exterior a 40 °C, y que no permita que entre en la habitación más de 5×10^6 cal de energía térmica diariamente. Suponga una conductividad térmica del vidrio de $0.96\ \mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$, es decir, $0.023\ \dfrac{\mathrm{cal}}{\mathrm{cm \cdot s \cdot K}}$.

SOLUCIÓN

De la ecuación 21-6:

$$\frac{Q}{A} = K\frac{\Delta T}{\Delta x},$$

donde Q/A es el calor transferido por segundo a través de la ventana.

$$1 \text{ día} = (24 \text{ h/día})\ (3600 \text{ s/h}) = 8.64 \times 10^4 \text{ s}$$

$$A = [(4 \text{ pies})\ (12 \text{ pulg/pie})\ (2.54 \text{ cm/pulg})]^2 = 1.486 \times 10^4 \text{ cm}^2$$

$$Q = \frac{(5 \times 10^6 \text{ cal/día})}{8.64 \times 10^4 \text{ s/día}} = 57.87 \text{ cal/s}$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{57.87 \text{ cal/s}}{1.486 \times 10^4 \text{ cm}^2} = 0.00389\ \frac{\mathrm{cal}}{\mathrm{cm^2 \cdot s}}$$

$$\frac{Q}{A} = 0.00389\ \frac{\mathrm{cal}}{\mathrm{cm^2 \cdot s}} = \left(0.0023\ \frac{\mathrm{cal}}{\mathrm{cm^2 \cdot s \cdot K}}\right)(40 - 25\ °\mathrm{C})/\Delta x$$

$$\Delta x = 8.87 \text{ cm} = \text{espesor}$$

El vidrio debería ser excepcionalmente grueso para impedir el flujo térmico máximo deseado. Podemos hacer varias cosas a fin de reducir el flujo térmico. Aunque todos los vidrios de silicatos tienen conductividades térmicas similares, podemos utilizar, en lugar de ellos, un material polimérico transparente (como el polimetilmetacrilato, por ejemplo). Los polímeros tienen conductividades térmicas de aproximadamente un orden de magnitud menor que el de los materiales cerámicos vítreos. También podemos utilizar vidrio doble, con los vidrios separados ya sea mediante un gas (aire o Ar que tienen una conductividad térmica muy baja) o una lámina de polímero transparente.

CHOQUE TÉRMICO

Falla de un material ocasionada por esfuerzos inducidos por cambios súbitos en la temperatura.

Factores

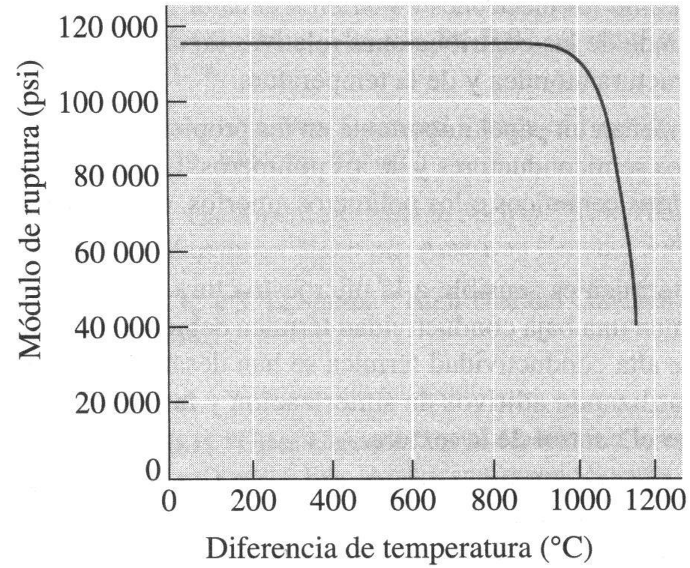
- α bajo ➡ minimiza cambios dimensionales y aumenta la capacidad de resistirlo.
- *K* alta ➡ ayuda a la transferencia de calor y reduce con rapidez las diferencias de T en el material.
- *E* bajo ➡ permite absorción de grandes cantidades de deformación antes de que los esfuerzos alcancen nivel crítico que ocasione fractura.
- K_c alto ➡ permite la absorción de mayores deformaciones → pocos y pequeños defectos.
- Transformaciones de fase. Cambios dimensionales asociados

⬇

SiO_2, cuarzo → cristobalita
$PbTiO_3$, cúbica → tetragonal

MEDICIÓN.- Determinar máximo ΔT que se puede tolerar durante un templado, sin afectar las propiedades mecánicas del material.

SiO_2 pura, fundida	3,000°C
$Si_3Al_3O_3N_5$	950°C
PSZ	500°C
SiC	350°C
Al_2O_3, vidrio ordinario	200°C



Efecto de ΔT de templado en el módulo de ruptura del Sialón.

<u>Otro método</u>:

Parámetro de choque térmico, *R'* o *R*. Representa el máximo ΔT que se puede presentar sin fracturar al material.

$$R' = \text{Parámetro de choque térmico} = \frac{\sigma_f K(1 - \nu)}{E \cdot \alpha}$$

$$R = \frac{\sigma_f \cdot (1 - \nu)}{E \cdot \alpha}$$

donde, σ_f = esfuerzo a la fractura del material

ν = relación de Possion