



Propriedades Térmicas

DEMEC – TM229

Prof. Adriano Scheid

Callister – Cap. 19



Propriedades Térmicas

Entende-se como propriedade térmica como a resposta de um material à aplicação de calor.

À medida que um sólido absorve energia na forma de calor, a sua temperatura e suas dimensões aumentam. A energia pode ser transmitida para regiões mais frias de uma peça ou amostra, se existirem gradientes de temperatura e, ao final, a amostra pode fundir.

Dentre as propriedades críticas para um sólido temos:

Capacidade Calorífica,

Expansão Térmica,

Condutividade Térmica.



Propriedades Térmicas: Capacidade Calorífica

Um material, quando aquecido, apresenta aumento da temperatura, o que significa que alguma energia foi absorvida.

A Capacidade Calorífica representa a quantidade de energia necessária para produzir um aumento unitário na temperatura.

Pode ser expressa por:

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Sendo dQ a energia necessária para produzir um aumento na temperatura em dT .

O **Calor Específico** é usual e representa a capacidade calorífica por unidade de massa, tendo como unidade o J/kgK ou cal/gK.

O C_v calor específico a volume constante e o C_p calor específico a pressão constante são usados com frequência e para sólidos tem valores próximos.





Propriedades Térmicas: *Capacidade Calorífica Vibracional*

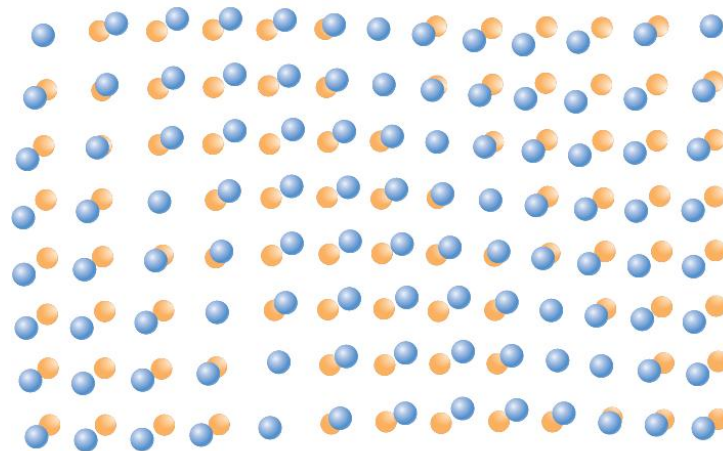
Na maioria dos sólidos, a principal maneira de assimilação da energia térmica é pelo aumento da energia vibracional dos átomos.

Os átomos em materiais sólidos estão constantemente vibrando em elevada frequência e baixa amplitude.

Apesar de estarem independentes uns dos outros, as vibrações dos átomos adjacentes estão acopladas pelas ligações atômicas.

Estas vibrações são coordenadas de tal forma que são produzidas ondas através do reticulado.

-  Posições normais de átomos na rede
-  Posições deslocadas devido às vibrações





Propriedades Térmicas: *Capacidade Calorífica Vibracional*

As ondas podem ser consideradas como elásticas ou simplesmente ondas sonoras, que possuem comprimentos de onda curtos e altas frequências e se propagam no cristal na velocidade do som.

A energia térmica vibracional para um material consiste de uma série de ondas elásticas, que possuem uma faixa de distribuições e frequências.

Apenas certos valores são permitidos (a energia é dita estar quantizada), e um único quantum de energia vibracional é chamado de **fônon**.

O espalhamento térmico dos elétrons durante a condução é causado por estas ondas vibracionais e estas ondas participam do transporte de energia térmica durante a condução térmica.



Propriedades Térmicas

Dependência da Capacidade Calorífica com a Temperatura

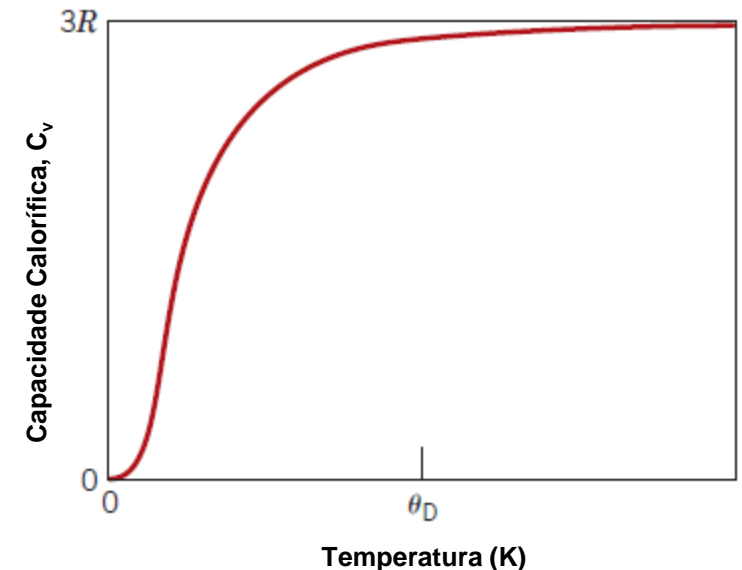
A variação da contribuição vibracional para a capacidade calorífica a volume constante em função da temperatura é mostrada abaixo.

C_v é zero a 0K, mas aumenta rapidamente com a temperatura, o que está relacionado à maior habilidade das ondas reticulares em aumentar a energia média com a elevação da temperatura.

Para baixas temperaturas, a relação entre C_v e a Temperatura é dada por

$$C_v = AT^3$$

Onde A é uma constante independente da temperatura.





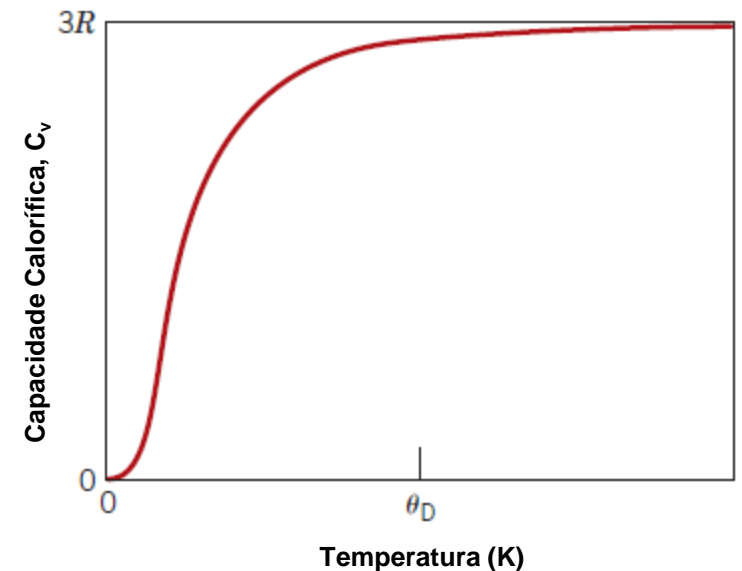
Propriedades Térmicas

Acima de θ_D , (temperatura de Debye) o valor de C_v se estabiliza e se torna independente da temperatura em um valor de aproximadamente $3R$ (constante dos gases).

Assim, embora a energia total do material esteja aumentando com a temperatura, a quantidade de energia necessária para produzir o aumento de um grau de temperatura é constante.

Para muitos materiais sólidos, θ_D é inferior à temperatura ambiente.

Um valor razoável para C_v é de 25J/molK para Temperatura ambiente.





Propriedades Térmicas

Material	C_p (J/kgK)	α ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1} \times 10^{-6}$	k (W/mK)	L ($\Omega\text{W}/(\text{K})^2 \times 10^{-8}$)
Metais				
Alumínio	900	23.6	247	2.20
Cobre	386	17.0	398	2.25
Ouro	128	14.2	315	2.50
Ferro	448	11.8	80	2.71
Níquel	443	13.3	90	2.08
Prata	235	19.7	428	2.13
Tungstênio	138	4.5	178	3.20
Aço SAE 1025	486	12.0	51.9	—
Aço Inoxidável 316	502	16.0	15.9	—
Bronze (70Cu-30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (50Fe-29Ni-17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe-36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe-32Ni-5Co)	500	0.72	10	2.68
Cerâmicos				
Alumina (Al_2O_3)	775	7.6	39	—
Maqnésia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	—
Espinélio (MgAl_2O_4)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	—
Sílica Fundida (SiO_2)	740	0.4	1.4	—
Vidro de Cal de Soda	840	9.0	1.7	—
Vidro Borossilicato (Pyrex)	850	3.3	1.4	—
Polímeros				
Polietileno de Alta Densidade	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polipropileno	1925	145–180	0.12	—
Poliestireno	1170	90–150	0.13	—
Politetrafluoretileno (Teflon)	1050	126–216	0.25	—
Fenol-Formaldeído – Fenólico	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6.6	1670	144	0.24	—
Poliisopreno	—	220	0.14	—



Propriedades Térmicas

Expansão Térmica

A maioria dos metais sólidos se expande quando é aquecido e se contrai quando é resfriado.

A variação no comprimento em função da temperatura para um material sólido pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l(T_f - T_0)$$

Ou

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T$$

Onde l_0 e l_f são os comprimentos inicial e final para uma variação de temperatura T_0 até T_f . O parâmetro α_l é conhecido como **coeficiente linear de expansão térmica** e é uma propriedade do material.



Propriedades Térmicas

Expansão Térmica

Uma vez que todas as dimensões são afetadas pelo aquecimento ou resfriamento, ocorre uma alteração de volume:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T$$

Onde ΔV e V_0 são a variação de volume e o volume original e o parâmetro α_v é conhecido como coeficiente volumétrico de expansão térmica.

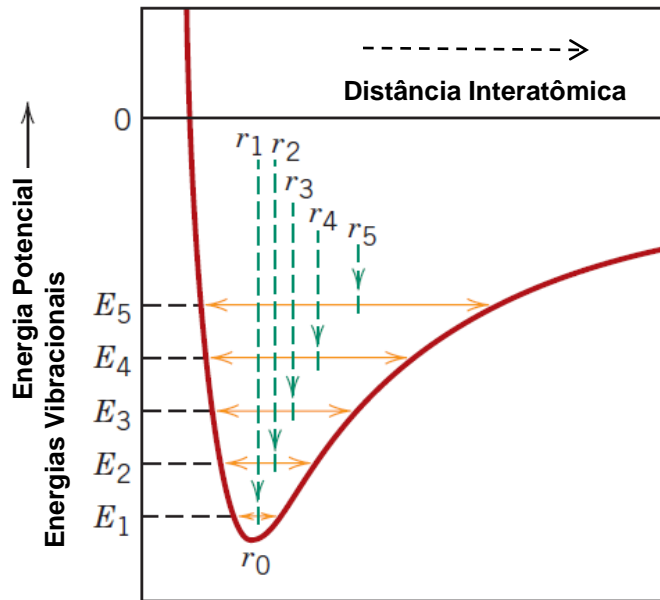
Em materiais Isotrópicos, $\alpha_v \sim 3\alpha_l$

Em materiais anisotrópicos α_v é dependente da direção.

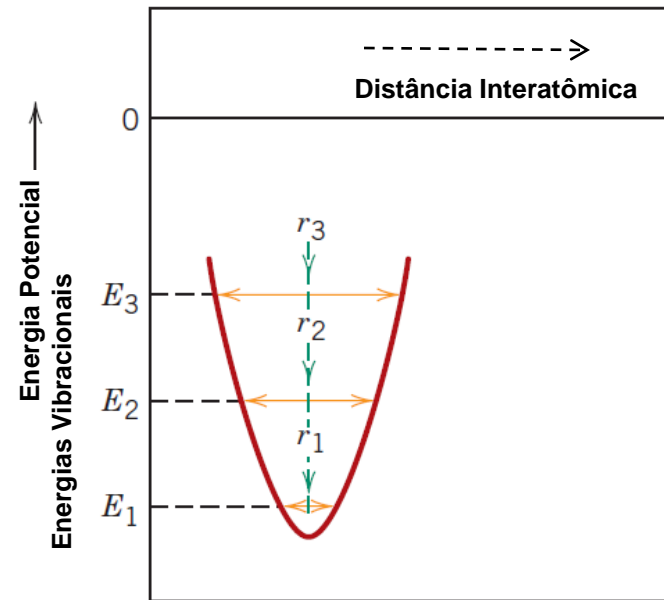


Propriedades Térmicas: Expansão Térmica

Pela perspectiva atômica, a expansão térmica se reflete em um aumento na distância média entre os átomos. Para curvas normais (a) existe mudança na posição média e já em (b) para curva simétrica a distância média é a mesma. A expansão térmica se deve a (a). Maior força de ligação resulta em poço mais profundo e mais estreito, ou menores coeficientes de expansão térmica.



(a)



(b)



Propriedades Térmicas: Expansão Térmica

Metais

O coeficiente de expansão térmica para os metais mais comuns mostra valores intermediários entre as Cerâmicas e os Polímeros.

Diversos metais e ligas com baixos e controlados coeficientes de expansão vem sendo desenvolvidos a fim de atender a demanda por materiais com estabilidade dimensional em temperatura.

Cerâmicas

Ligações interatômicas fortes resultam em baixos coeficientes de expansão térmica.

Cerâmicas amorfas e cristalinas na forma cúbica, α_l é **isotrópico**.



Propriedades Térmicas: Expansão Térmica

Cerâmicas

As demais Cerâmicas cristalinas são **anisotrópicas**, ou seja, quando aquecidas contraem em algumas direções e expandem em outras.

Para vidros, o coeficiente de expansão térmica depende da composição do vidro.

Vidros puros baseados em SiO_2 (Sílica) tem baixos coeficientes de expansão, o que é explicado pelo baixo empacotamento atômico, resultando em pequenas variações macroscópicas de dimensão quando aquecidos.



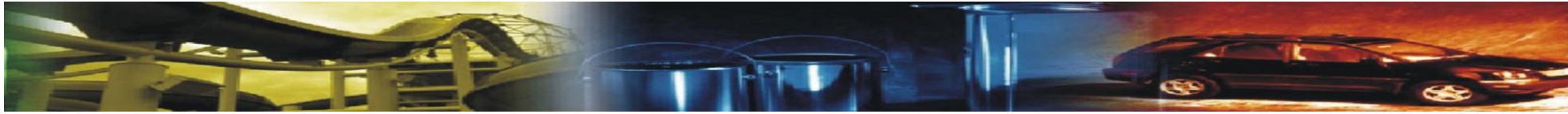
Propriedades Térmicas: Expansão Térmica

Polímeros

Os polímeros apresentam as maiores expansões térmicas no aquecimento.

Polímeros lineares e ramificados são os que apresentam os maiores valores de α_l , devido a presença de ligações fracas intermoleculares e ausência de ligações cruzadas.

Os polímeros apresentam redução na expansão térmica à medida que o número de ligações cruzadas aumenta e os menores coeficientes de expansão são observados nos polímeros tridimensionais.



Propriedades Térmicas

Condutividade Térmica

A condução térmica é o fenômeno pelo qual o calor é transportado das regiões de mais alta para as de mais baixa temperatura de um material.

A condutividade térmica caracteriza a habilidade do material em transferir calor e é dada por:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Onde: q é o fluxo de calor, k é a condutividade térmica e dT/dx é o gradiente de temperatura no meio de condução de calor.



Propriedades Térmicas

Mecanismos de Condução de Calor

A condução de calor ocorre por ondas de vibração do reticulado (fônons) e pelos elétrons livres, sendo a condutividade térmica a soma das duas contribuições:

$$k = k_l + k_e$$

Normalmente um ou outro termo domina o processo de condução.

Metais

Nos metais de elevada pureza, o transporte de calor por elétrons é mais eficiente que o transporte por fônons, pois os elétrons são menos facilmente espalhados que os fônons e tem maiores velocidades.



Propriedades Térmicas

Metais

O número de elétrons livres é grande nos metais e participam no processo de condução de calor.

Uma vez que a condutividade elétrica e térmica dos metais é relativa aos elétrons nos metais puros, estes podem ser correlacionados pela ***Lei de Wiedemann-Franz***:

$$L = \frac{k}{\sigma T}$$

Onde σ é a condutividade elétrica, T a temperatura absoluta e L uma constante.

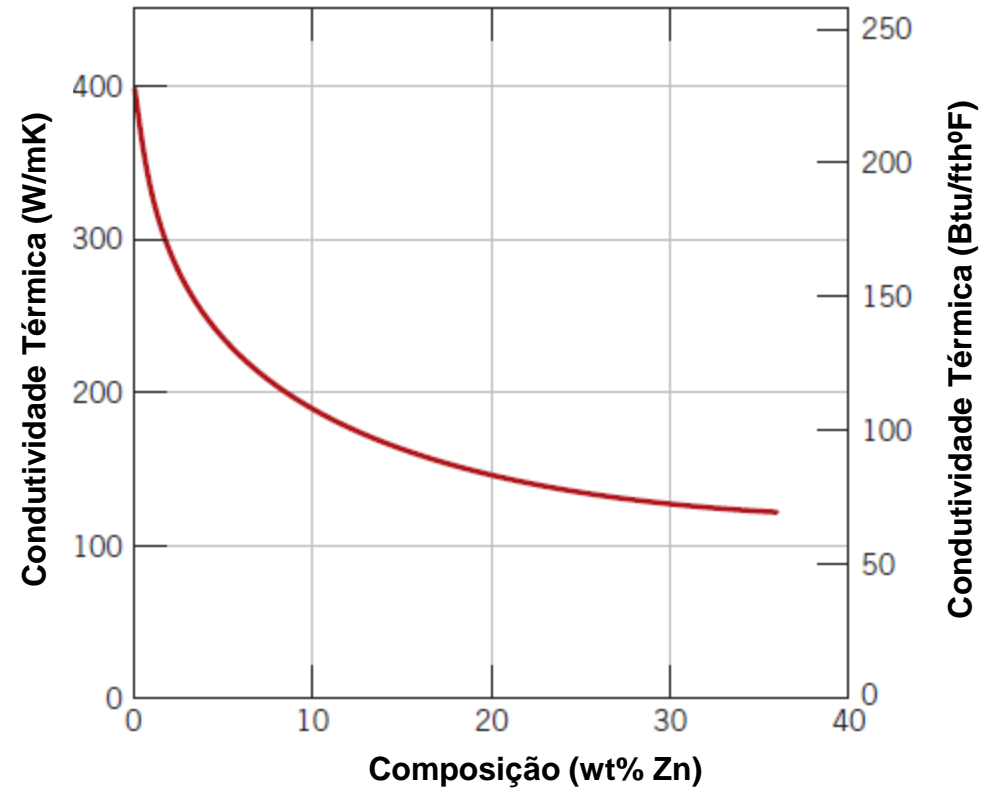


Propriedades Térmicas

Metais

A adição de elementos de liga aos metais resulta em decréscimo da condutividade térmica, pelas mesmas razões que levam à redução da condutividade elétrica.

As soluções sólidas atuam como centros de espalhamento, reduzindo a eficiência da mobilidade eletrônica.





Propriedades Térmicas

Cerâmicas

Materiais não metálicos são isolantes térmicos, devido ao reduzido número de elétrons livres. Neste caso, os fônons são responsáveis pela condução de calor, sendo $k_e \ll k_l$.

Os fônons não são efetivos na condução de calor, uma vez que são espalhados pelos defeitos no reticulado.

Vidros e outras **Cerâmicas amorfas** apresentam mais baixas condutividades térmicas em relação às Cerâmicas cristalinas, uma vez que o espalhamento de fônons é mais efetivo em estruturas irregulares ou desordenadas.

A porosidade reduz a condutividade térmica, à medida que a condução do calor através dos poros é lenta e ineficiente.

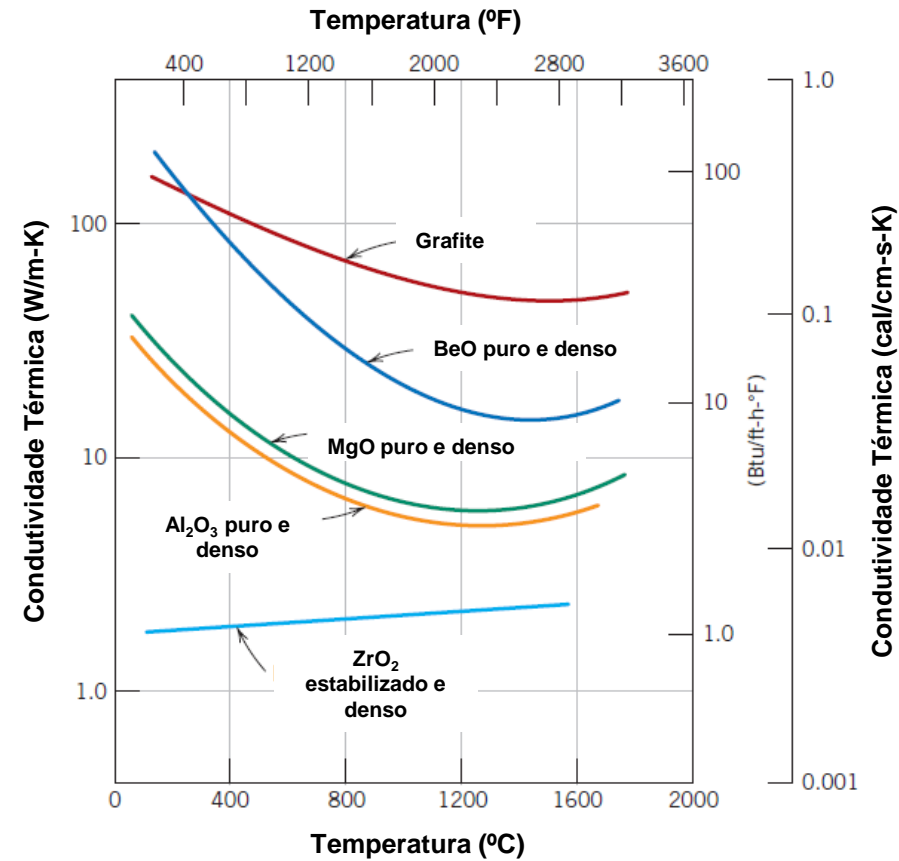


Propriedades Térmicas

Cerâmicas

Para **baixas temperaturas**, à medida que a temperatura aumenta, maior o espalhamento causado pelo reticulado, resultando em menor condutividade.

Para **altas temperaturas**, a condutividade térmica se eleva em função da transferência do calor radiante. Significantes quantidades de radiação infravermelha podem ser transportadas através das Cerâmicas transparentes.





Propriedades Térmicas

Polímeros

A condutividade térmica dos Polímeros é baixa. ***A energia é transferida por meio da vibração e rotação das cadeias.***

A condutividade térmica é dependente da cristalinidade dos Polímeros. Assim, **alta cristalinidade resulta em elevada condutividade** e baixa cristalinidade resulta em baixa condutividade térmica.

Isto é explicado pela vibração mais efetiva das moléculas mais ordenadas ou cristalinas.

Os Polímeros são usados como isolantes térmicos como resultado da baixa condutividade térmica. A característica isolante pode ser otimizada pela introdução de poros (Polímer foams).



Propriedades Térmicas

Tensões Térmicas

As tensões térmicas são tensões induzidas em um corpo como resultado de mudanças de temperatura.

É importante entender a origem e a natureza destas tensões térmicas, uma vez que elas podem levar à fratura ou deformação plástica indesejável.



Propriedades Térmicas

Tensões Térmicas resultantes da restrição à Expansão Térmica e à Contração

Considerando um sólido homogêneo e isotrópico, aquecido sem gradientes de temperatura (ou uniformemente).

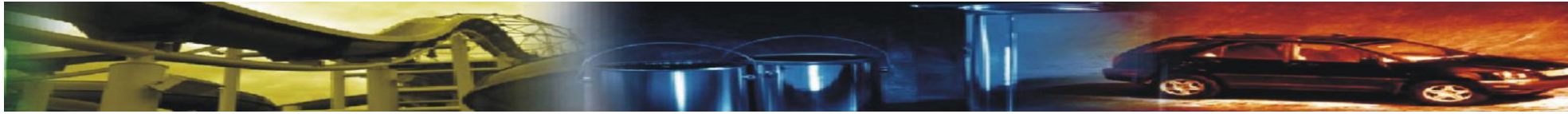
Para expansão livre não há geração de tensões.

Para expansão restringida por suportes nas extremidades, surgirão tensões, cuja magnitude será dada por:

$$\sigma = E\alpha_l(T_0 - T_f) = E\alpha_l\Delta T$$

E é o módulo de Elasticidade, α_l é o coeficiente de expansão térmica linear.

O aquecimento restrito gera tensões compressivas e o resfriamento gera tensões trativas.



Propriedades Térmicas

Tensões resultantes de Gradientes Térmicos

Quando um corpo sólido é aquecido ou resfriado, a distribuição de temperatura dependerá do tamanho, forma, condutividade térmica e da taxa de variação da temperatura.

Os gradientes térmicos induzem tensões térmicas através da peça, sendo, com freqüência, causados por aquecimento / resfriamento rápido.

Diferenças de seção em componentes atuam como restrições à expansão ou contração térmica entre diferentes regiões de uma peça.

Exemplificar processos de tratamento térmico.



Propriedades Térmicas: Choque Térmico em Materiais Frágeis

Tensões térmicas induzidas em materiais dúcteis (Metais e Polímeros) podem resultar em deformação plástica.

Quando as tensões térmicas estão presentes em materiais frágeis (Cerâmicas), o resultado pode ser uma fratura frágil.

No resfriamento a condição é mais crítica, uma vez que surgem tensões trativas na superfície.

A Resistência ao Choque Térmico (TSR) é referida como a habilidade de um material a resistir à falha por este mecanismo. As Cerâmicas mais resistentes ao choque térmico são aquelas com elevada tensão de fratura (σ_f) e elevada condutividade térmica (k), bem como baixo módulo de elasticidade (E) e baixo coeficiente de expansão térmica (α_l).

$$TSR \cong \frac{\sigma_f k}{E \alpha_l}$$



Propriedades Térmicas: Choque Térmico em Materiais Frágeis

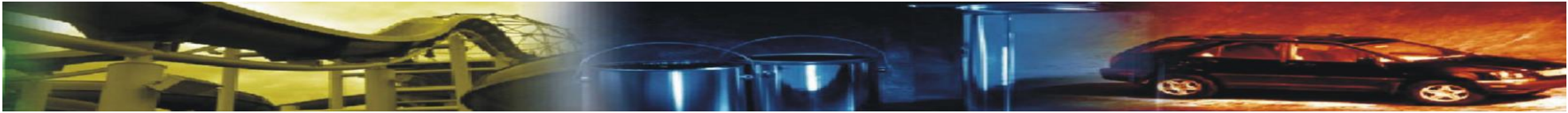
Uma maneira de minimizar o choque térmico é alterando as condições externas pela taxa de aquecimento e resfriamento, a fim de reduzir os gradientes térmicos no componente.

Um dos parâmetros mais facilmente manipulado é o coeficiente linear de expansão térmica.

Os vidros à base de CaO e Na_2O apresentam α_l de $9 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$, são susceptíveis ao choque térmico. Os vidros com teores reduzidos de CaO e Na_2O e com adições de B_2O_3 em teores a fim de formar vidro Borossilicato (Pyrex) reduzirá o coeficiente de expansão ao valor de $3 \times 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$.

Estes vidros são adequados à fornos de cozinha, que passam por ciclos de aquecimento / resfriamento.

A presença de grandes poros e segunda fase aumentam TSR.



FIM