

**LISTA DE EXERCÍCIOS VI: Propriedades Térmicas**

1) Para o alumínio, a capacidade calorífica a volume constante,  $C_v$ , a 30 K é de 0,81 J/mol.K; a temperatura de Debye é de 375 K. Estime o calor específico:

(a) a 50 K;

(b) a 425 K.

2) Uma tira bimetálica é construída a partir de tiras de dois metais diferentes que estão ligados ao longo dos seus comprimentos. Explique como tal dispositivo pode ser usado em um termostato para regular a temperatura.

3) (a) Explique por que o anel de latão da tampa de uma jarra de vidro irá afrouxar quando esta for aquecida.

(b) Suponha que o anel seja feito de tungstênio em vez de latão. Qual será o efeito do aquecimento da tampa e da jarra? Por quê?

Dados:  $\alpha_1$  do latão =  $20 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_1$  do vidro =  $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\alpha_1$  do tungstênio =  $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

4) Um fio de alumínio com 10 m de comprimento é resfriado desde 38 até  $-1^\circ\text{C}$ . Qual será a variação de comprimento que esse fio experimentará?

5) Até que temperatura uma barra cilíndrica de tungstênio com 15,025 mm de diâmetro e uma placa de aço 1025 com um orifício circular de 15,000 mm de diâmetro devem ser aquecidos para que a barra se ajuste exatamente no interior do buraco? Considere que a temperatura inicial seja de  $25^\circ\text{C}$ .

6) (a) Calcule o fluxo de calor através de uma chapa de aço com 10 mm de espessura se as temperaturas das duas faces forem de 300 e  $100^\circ\text{C}$ ; considere um escoamento de calor em regime estacionário.

(b) Qual é a perda de calor por hora se a área da chapa é de  $0,25 \text{ m}^2$ ?

(c) Qual será a perda de calor por hora se um vidro de cal de soda for usado em lugar do aço?

(d) Calcule a perda de calor por hora se for usado aço e se a espessura for aumentada para 20 mm.

Dados: Condutividade Térmica do aço =  $51,9 \text{ W/m-K}$

Condutividade térmica do vidro de cal soda =  $1,7 \text{ W/m-K}$

7) Explique sucintamente por que a condutividade térmica de cerâmicas cristalinas costuma ser maior do que para as cerâmicas não-cristalinas.

8) Explique sucintamente por que os metais são tipicamente melhores condutores térmicos do que os materiais cerâmicos.

9) a) Explique sucintamente por que a porosidade diminui a condutividade térmica dos materiais cerâmicos e poliméricos, tornando-os mais isolantes termicamente

b) Explique sucintamente como o grau de cristalinidade afeta a condutividade térmica dos materiais poliméricos e por quê.

10) Por que a condutividade térmica primeiro diminui e em seguida aumenta com a elevação da temperatura, para alguns materiais cerâmicos?

11) Para cada um dos seguintes pares de materiais, decida qual material possui a maior condutividade térmica. Justifique as suas escolhas.

(a) Prata pura; prata de lei (92,5%p Ag-7,5%p Cu);

(b) Sílica fundida; sílica policristalina;

(c) Policloreto de vinila (PVC) linear e sindiotático (Grau de polimerização = 1000); poliestireno linear e sindiotático (Grau de polimerização = 1000);

(d) Polipropileno atático (Peso molecular =  $1 \cdot 10^6$  g/mol); polipropileno isotático (Peso molecular =  $5 \cdot 10^5$  g/mol).

12)(a) Explique sucintamente por que podem ser introduzidas tensões térmicas em uma estrutura pelo seu aquecimento ou resfriamento rápido.

(b) Qual é a natureza das tensões superficiais no resfriamento?

(c) Qual é a natureza das tensões superficiais no aquecimento?

(d) Para um material cerâmico, é mais provável a ocorrência de um choque térmico em um aquecimento rápido ou em um resfriamento rápido? Por quê?

e) Quais medidas poderiam ser tomadas para reduzir a probabilidade de choque térmico de uma peça cerâmica?

13) (a) Se um bastão em aço 1025 com 0,5 m de comprimento for aquecido de 20 até 80°C enquanto as suas extremidades são mantidas rígidas, determine o tipo e a magnitude da tensão que se desenvolve. Admita que a 20°C o bastão esteja livre de tensões.

(b) Qual será a magnitude da tensão se um bastão com 1 m de comprimento for usado?

(c) Se o bastão citado na parte a) for resfriado de 20°C até - 10°C, qual tipo e magnitude de tensão irá resultar?

14) Um arame de cobre é esticado com uma tensão de 70 MPa a 20°C. Se o seu comprimento for mantido constante, até que temperatura o arame deve ser aquecido para que a tensão seja reduzida para 35 MPa?

15) Trilhos de estradas de ferro fabricados em aço 1025 devem ser posicionados durante o período do ano em que a temperatura média é de 4°C. Se uma folga de 5,4 mm for deixada entre trilhos padrões com 11,9 m de comprimento, qual é a temperatura mais elevada possível que pode ser tolerada sem que haja a introdução de tensões térmicas?

16) As extremidades de um bastão cilíndrico com 6,4 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento estão montadas entre suportes rígidos. O bastão está livre de tensões à temperatura ambiente (20°C), e mediante o resfriamento até uma temperatura de -60°C é possível uma tensão de tração termicamente induzida máxima de 138 MPa. Dentre os seguintes metais e ligas, a partir de quais materiais o bastão pode ser fabricado e por quê?

<b>Liga</b>	<b>Coefficiente de expansão linear (°C<sup>-1</sup>)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>
Alumínio	$23,6 \cdot 10^{-6}$	69
Cobre	$17,0 \cdot 10^{-6}$	110
Latão	$20,0 \cdot 10^{-6}$	97
Aço 1025	$12,0 \cdot 10^{-6}$	207
Tungstênio	$4,5 \cdot 10^{-6}$	407

## GABARITO

1) a)  $c_v(50K) = 139 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

b)  $c_v(425K) = 925 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

2) Os dois metais a partir dos quais uma tira bimetálica é construída têm diferentes coeficientes de expansão térmica. Conseqüentemente, uma mudança na temperatura fará com que a tira se dobre. Para um termostato que opera um forno, quando a temperatura cai abaixo de um limite inferior, a tira bimetálica se dobra para fazer um contato elétrico, ligando o forno. Com o aumento da temperatura, a tira curva-se na direção oposta, quebrando o contato (e desligando o forno) quando uma temperatura limite é excedida.

3) (a) Uma tampa de latão em um frasco de vidro vai soltar quando aquecido porque o latão tem o maior coeficiente de expansão térmica.

b) Se o anel for feito de tungstênio em vez de latão, o anel irá apertar, uma vez que o vidro se expande mais do que o tungstênio.

4) A variação do comprimento será de  $-9.2 \text{ mm}$  (contração).

5)  $T_f = 247,44^\circ\text{C}$

6) a)  $q = 1,04 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$     b)  $\dot{q} = 9,3 \cdot 10^8 \text{ J/h}$     c)  $\dot{q} = 3,06 \cdot 10^7 \text{ J/h}$     c)  $\dot{q} = 4,7 \cdot 10^8 \text{ J/h}$

7) A condutividade térmica é mais alta para cerâmicas cristalinas do que para cerâmicas não cristalinas porque, em uma rede não-cristalina, o espalhamento de fônons e, portanto, a resistência ao transporte de calor, é muito mais eficaz devido à estrutura atômica altamente desordenada e irregular.

8) Metais são tipicamente melhores condutores térmicos do que materiais cerâmicos porque, para metais, a maior parte do calor é transportada por elétrons livres (dos quais existem números relativamente grandes). Em materiais cerâmicos, o principal modo de condução térmica é via fônons, e os fônons são mais facilmente dispersos do que os elétrons livres.

9) (a) A porosidade diminui a condutividade térmica de materiais cerâmicos e poliméricos porque a condutividade térmica de uma fase gasosa que ocupa o espaço dos poros é

extremamente pequena em relação à do material sólido. Além disso, as contribuições da convecção gasosa são geralmente insignificantes.

(b) Aumentar o grau de cristalinidade de um polímero semicristalino aumenta sua condutividade térmica; as vibrações, rotações, etc. das cadeias moleculares são modos mais eficazes de transporte térmico quando uma estrutura cristalina prevalece.

10) Para alguns materiais cerâmicos, a condutividade térmica primeiro diminui com o aumento da temperatura porque o espalhamento das vibrações da rede aumenta com a temperatura. Em temperaturas mais altas, a condutividade térmica aumentará para algumas cerâmicas porosas, porque a transferência de calor radiante através dos poros pode se tornar importante, cujo processo aumenta com o aumento da temperatura.

11) (a) A prata pura terá uma condutividade maior que a prata de lei, porque os átomos de impureza no segundo conduzirão a um maior grau de dispersão de elétrons livres.

(b) A sílica policristalina terá uma condutividade maior que a sílica fundida porque a sílica fundida é não cristalina e as vibrações de rede (fônons) são dispersas de maneira mais eficaz em materiais não cristalinos.

(c) O policloreto de vinila terá a maior condutividade que o poliestireno, porque o primeiro terá o maior grau de cristalinidade. Ambos os polímeros são sindiotáticos e possuem o mesmo grau de polimerização. No entanto, com relação ao volume do grupo lateral, é mais provável que o PVC cristalize. Como a transferência de calor é realizada por vibrações da cadeia molecular, e a coordenação dessas vibrações aumenta com a cristalinidade percentual, quanto maior a cristalinidade, maior a condutividade térmica.

(d) O polipropileno isotático terá uma maior condutividade térmica do que o polipropileno atático, porque os polímeros isotáticos têm um maior grau de cristalinidade. A influência da cristalinidade na condutividade é explicada na parte (c).

12)(a) Tensões térmicas podem ser introduzidas em uma estrutura por aquecimento ou resfriamento rápidos, pois gradientes de temperatura serão estabelecidos através da seção transversal devido a mudanças de temperatura mais rápidas na superfície do que no interior; assim, a superfície se expandirá ou se contrairá em uma taxa diferente do interior e, uma vez que essa expansão ou contração da superfície será restringida pelo interior, as tensões serão introduzidas.

(b) Para o resfriamento, as tensões da superfície serão de natureza trativa (de tração), uma vez que o interior se contrai em um grau menor que a superfície resfriada.

(c) Para o aquecimento, as tensões da superfície serão de natureza compressiva, uma vez que o interior se expande em um grau menor do que a superfície mais quente.

d) Para um material cerâmico, o choque térmico é mais provável para o resfriamento rápido, uma vez que as tensões da superfície são de tração na natureza, o que levará a concentrações de tensão nas falhas superficiais que estão presentes. As tensões geradas por aquecimento rápido não são capazes de provocar choque térmico.

e) A resistência ao choque térmico de uma peça de cerâmica pode ser melhorada aumentando-se a resistência à fratura e a condutividade térmica ou diminuindo-se o módulo de elasticidade e o coeficiente linear de expansão térmica. Destes parâmetros,  $\sigma_f$  e  $\alpha_l$  são mais suscetíveis a alterações, geralmente por meio da alteração da composição e/ou a microestrutura.

13) a)  $\sigma_{\text{comp}} = -150 \text{ MPa}$  (tensão de compressão)

b)  $\sigma_{\text{comp}} = -150 \text{ MPa}$  (tensão de compressão)

c)  $\sigma_{\text{tra}} = 75 \text{ MPa}$  (tensão de tração)

14)  $T = 39^\circ\text{C}$

15)  $T = 41.8^\circ\text{C}$

16) O alumínio é o único material adequado, com um tensão trativa termicamente induzida de 130 MPa.