Lista de Exercícios 9	**Comportamento Mecânico dos Materiais - Parte II**

2014

1. Suponha que você é o responsável pelo projeto de uma turbina a gás funcionando a 800 ºC. As palhetas do rotor serão construídas em uma superliga à base de níquel, que, nessa temperatura, apresenta um módulo de elasticidade igual a 180 GPa. Quando colocadas em serviço, e sob o efeito da força centrífuga, as palhetas são submetidas a um esforço que gera uma tensão normal de 450 MPa. Você dispõe dos dados experimentais apresentados abaixo, relativos ao estágio II das curvas de fluência desse material.

	Deformação plástica em fluência (ε_p, em %)		
	Temperatura (ºC)		
Tempo (h)	700	800	900
1000	0,100	0,500	0,900
11000	0,200		22,036

a) Qual é a deformação elástica instantânea que sofrem as palhetas quando são colocadas em serviço?
b) Qual é o valor da velocidade de fluência $d\varepsilon/dt$ (em h^{-1}) para o estágio II de fluência dessa superliga a 700 ºC e a 900 ºC?
c) Qual é o valor da energia aparente de ativação (em kJ/mol) da velocidade de fluência no estágio II para essa superliga, sabendo-se que a equação abaixo é válida?

$$\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_T = C\exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

onde **T** é a temperatura absoluta; **C** é uma constante característica do material; **R** é a constante dos gases (**R** = 8,314 J/mol); **ε** é a deformação plástica em fluência; **t** é o tempo; **Q** é a energia aparente de ativação.

d) Com os dados experimentais, e com os resultados calculados nos itens anteriores, calcule o valor da deformação plástica depois de 11000 h de operação a 800 ºC.
e) Se a velocidade em serviço da turbina fosse mais elevada, a deformação calculada no item anterior seria atingida depois de um tempo de operação maior ou menor que 11000 h? Justifique a sua resposta.

2. Para uma liga de alumínio, ensaios de fadiga em flexão rotativa foram realizados em corpos de prova com seção transversal constante **d**, e apresentaram os resultados dados na tabela. Os valores apresentados representam a média aritmética de dois ensaios realizados à mesma temperatura.

a) Traçar a curva S-N para essa liga.
b) Determinar o limite de fadiga para um número de ciclos aplicado igual a 10^7.

Amplitude da tensão $\Delta\sigma$ (MPa)	400	350	300	250	220	180	170	160
N (número de ciclos na ruptura)	$1{,}8x10^4$	$4{,}5x10^4$	$2{,}0x10^5$	$1{,}0x10^6$	$5{,}5x10^6$	$5{,}0x10^7$	$1{,}x10^8$	$7{,}0x10^8$

3. Você deseja determinar a temperatura de transição frágil-dúctil de um aço. Foram feitos 15 ensaios de impacto a cinco temperaturas diferentes (três ensaios por temperatura), segundo a tabela indicada abaixo. O pêndulo do ensaio de impacto cai de uma altura inicial de 80cm, e a tabela mostra a altura final atingida pelo pêndulo a cada ensaio. Determine a temperatura de transição a partir desses dados experimentais, que será definida pela energia média entre as energias do "patamar frágil" e do "patamar dúctil".

Temperatura (ºC)	Altura **h** (cm) do pêndulo após impacto		
-60	70	75	65
-40	65	60	70
-20	20	25	25
0	5	não quebrou	10
+20	5	5	não quebrou

Lista de Exercícios 8	***Diagramas de fases II e Transformações de fases Comportamento mecânico - Parte I***
2014	*Resolução*

1a

A deformação elástica instantânea que as palhetas sofrem quando entram em serviço obedece a equação:

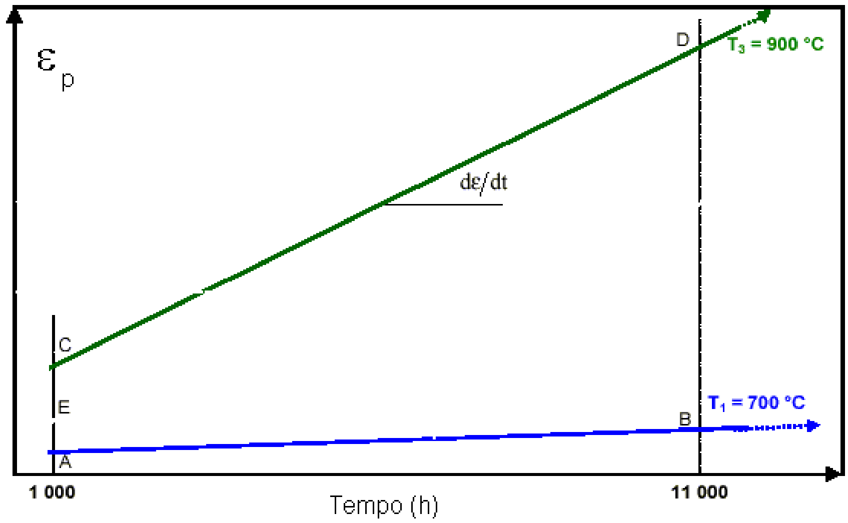
$$\boldsymbol{\sigma = E \times \varepsilon_{el}}$$

$\varepsilon_{el} = (\sigma / E) = (\,450\text{MPa} / 180\text{ GPa}\,) = 2{,}5 \times 10\text{-}3$ ou $\boldsymbol{\varepsilon_{el} = 0{,}25\%}$

1b

Os resultados experimentais podem ser colocados em um gráfico. No estágio II da fluência, a velocidade de fluência é constante. Assim, podemos assumir que durante todo esse intervalo de tempo, temos retas no gráfico.

	Deformação plástica em fluência (ε_p, em %)		
	Temperatura (ºC)		
Tempo (h)	700	800	900
1000	0,100	0,500	0,900
11000	0,200		22,036



Os valores das velocidades de fluência para 700 ºC e 900 ºC são, então, calculados:

Temperature (°C)	Velocidade de Fluência (h⁻¹)	
700	$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon_{pB} - \varepsilon_{pA}}{t_B - t_A} = \frac{2x10^{-3} - 1x10^{-3}}{11000 - 1000}$	$\mathbf{10^{-7}}$
900	$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon_{pD} - \varepsilon_{pC}}{t_D - t_C} = \frac{2{,}2036x10^{-1} - 9x10^{-3}}{11000 - 1000}$	$\mathbf{2{,}1136x10^{-5}}$

1c

A fluência é um fenômeno termicamente ativado. A equação da variação da velocidade da fluência com a temperatura é dada por:	$(d\varepsilon/dt)_T = C\exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$

Aplicando a equação para duas temperaturas diferentes T_1 e T_3, e calculando a razão entre as velocidades nas duas temperaturas, temos: $\frac{(d\varepsilon/dt)_{T3}}{(d\varepsilon/dt)_{T1}} = \frac{\exp\left(-Q/RT_3\right)}{\exp\left(-Q/RT_1\right)} = \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_3}\right)\right]$	A equação acima pode ser rearranjada como segue: $Q = \frac{R\ln\left(\frac{(d\varepsilon/dt)_{T3}}{(d\varepsilon/dt)_{T1}}\right)}{\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_3}\right)}$
Para T_1 = 700 °C = 973 K e T_3 = 900 °C = 1173 K, e sabendo que R = 8,314 J/mol, e tomando os valores de velocidade de fluência calculados no item 1, temos que a energia aparente de ativação do processo de fluência nessa superliga é de **Q = 254 kJ/mol**.	

1d

Como no item anterior foi calculado o valor de Q, através da equação ao lado, pode ser calculado o valor de C, necessário para o cálculo da deformação depois de 11000 h a 800 °C.

$$(d\varepsilon/dt)_T = C\exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

Substituindo os valores correspondentes de velocidade e temperatura para uma das temperaturas que dispomos de dados (700 °C ou 900 °C), podemos calcular o valor de **C**, que é igual a **4,33 x 10^{6} h^{-1}**.

Agora, utilizando a mesma equação, e substituindo os valores disponíveis para a temperatura de 800 °C: $(d\varepsilon/dt)_T = C\exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$	d□ε = $\varepsilon_{800,11000h}$ – 0,5 x 10^{-2} dt = (11000-1000) = 10000 h **$\varepsilon_{800,11000h}$ é igual a 0,0238 (ou, em porcentagem, 2,38%).**

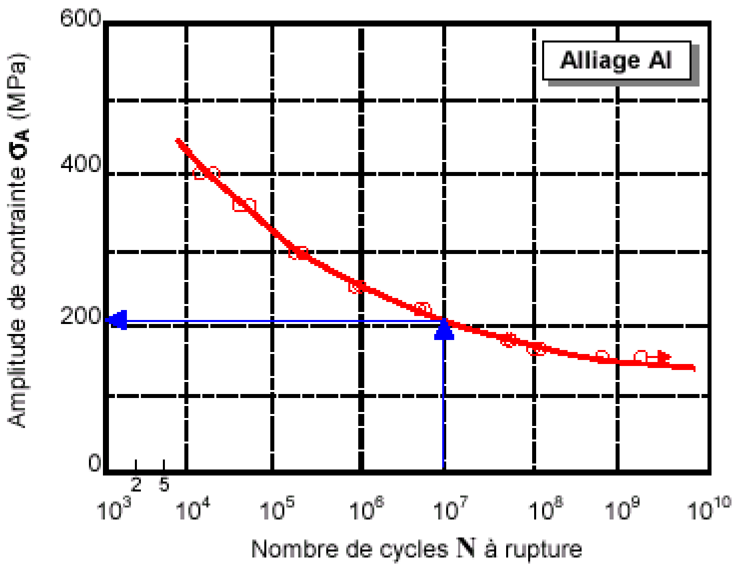
1e

Uma velocidade de rotação mais elevada significa uma força centrífuga maior, e, portanto, um esforço mecânico maior. O esforço sendo maior, a velocidade de fluência será maior. Conseqüentemente, a mesma deformação seria atingida num tempo menor que 11000 h.

2a

Utilizando os dados experimentais apresentados no exercício, a curva S-N (diagrama de Wöhler) pode ser facilmente construída.

Curva S-N para a liga considerada



2b

Para obter o valor de σA (limite de fadiga), basta ler na curva o valor, para N = 107 ciclos.

Esse valor é de aproximadamente 205 MPa.

3 A energia absorvida para romper um corpo de prova num ensaio de impacto Charpy é dada pela equação

$$W_f = mg\ (h_i - h_f)$$

O critério para a definição da temperatura de transição é o meio do intervalo entre o "patamar dúctil" e o "patamar frágil". O primeiro patamar se encontra a Δh = 75cm, e o segundo a Δh = 10cm. No gráfico encontra-se indicada a operação para a determinação do valor aproximado da temperatura de transição, que é de aproximadamente **–27 °C**.