Lista de Exercícios 08 / 2018	**Comportamento mecânico dos materiais - Parte II**

1. Suponha que você é o responsável pelo projeto de uma turbina a gás que deverá funcionar a 800ºC. 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 serão 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 será a deformação elástica instantânea que sofrerão as palhetas quando colocadas em serviço?

b) Qual será o valor da velocidade de fluência, $d\varepsilon_p/dt$ (em h^{-1}), para o estágio II de fluência dessa superliga a 700ºC e a 900ºC?

c) Qual é o valor da energia aparente de ativação, Q (em kJ/mol), da velocidade de fluência no estágio II para essa superliga?

Sabe-se que a velocidade de fluência obedece a equação:

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

onde ε_p é a deformação plástica em fluência; t é o tempo; T é a temperatura absoluta; C é uma constante característica do material e R é a constante universal dos gases (R = 8,314 J/mol).

d) Com os dados experimentais fornecidos, e com os resultados calculados nos itens anteriores, calcule qual será o valor da deformação plástica das palhetas depois de 11000 h de operação a 800ºC.

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 que apresentaram os resultados dados na tabela. Os valores apresentados representam a média aritmética de dois ensaios realizados a mesma temperatura.

Amplitude da tensão $\Delta\sigma$ (MPa)	400	350	300	250	220	180	170	160
N (número de ciclos na ruptura)	$1{,}8\times10^4$	$4{,}5\times10^4$	$2{,}0\times10^5$	$1{,}0\times10^6$	$5{,}5\times10^6$	$5{,}0\times10^7$	$1{,}0\times10^8$	$7{,}0\times10^8$

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.

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 80 cm, 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 do pêndulo após o impacto (cm)		
-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 08 / 2018	**Comportamento mecânico dos materiais - Parte II**
Resolução	

Exercício 1

1a

A deformação elástica instantânea (ε_{el}) que as palhetas sofrerão quando colocadas em serviço obedece a equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{el}$$

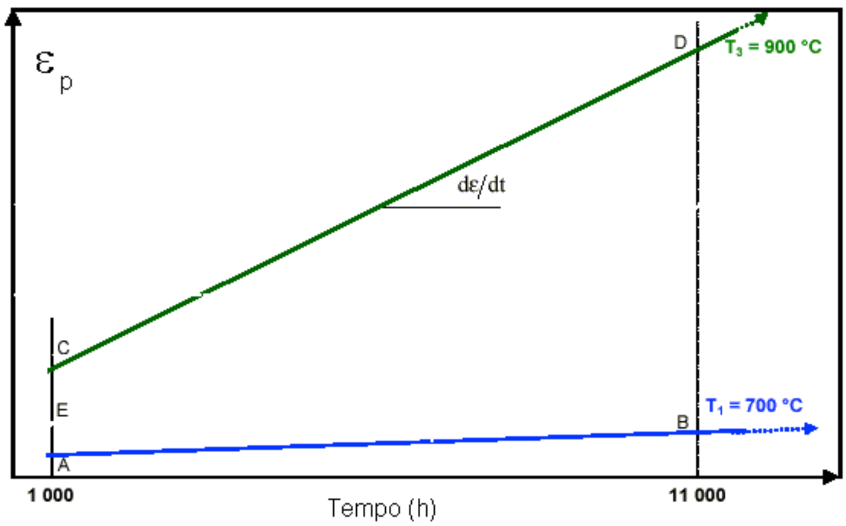
Portanto,

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

1b

Os resultados experimentais podem ser colocados em um gráfico. Como no estágio II da fluência, a velocidade de fluência é constante, podemos assumir um comportamento linear para ε_p em função do tempo, para cada uma das temperaturas.

	Deformação plástica em fluência (ε_p, em %)		
	Temperatura (ºC)		
Tempo (h)	700	**Tempo (h)**	700
1000	0,100	1000	0,100
11000	0,200	11000	0,200



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

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

1c

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

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 ao lado 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 = 700ºC = 973 K e T_3 = 900ºC = 1173 K, sabendo que R = 8,314 J/mol, e tomando os valores de velocidade de fluência calculados no item 1b, temos que a energia aparente de ativação do processo de fluência nessa superliga é de Q = 254 kJ/mol.

1d

No item anterior foi calculado o valor de Q, utilizando a equação ao lado. Agora, podemos utilizar essa equação para calcular o valor de C, necessário para o cálculo da deformação depois de 11000 h a 800ºC.

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

Substituindo os valores correspondentes de velocidade e temperatura para uma das temperaturas que dispomos de dados (700ºC ou 900ºC), podemos calcular o valor de C, obtendo $C = 4{,}33 \times 10^{6}\ h^{-1}$.

Utilizando novamente a equação, $\left(\frac{d\varepsilon_p}{dt}\right)_T = C\exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$ e substituindo os valores disponíveis para a temperatura de 800ºC, podemos determinar a deformação das palhetas, $\varepsilon_{p[800ºC,11000h]}$, depois de 11000 h de operação.	Lembrando que a velocidade de fluência é constante no estágio II de fluência, temos $\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_{p[800ºC,11000h]} - 0{,}5 \times 10^{-2}$ Δt = (11000 - 1000) = 10000 h Portanto, $\varepsilon_{p[800ºC,11000h]} = 0{,}0238 = 2{,}38\%$

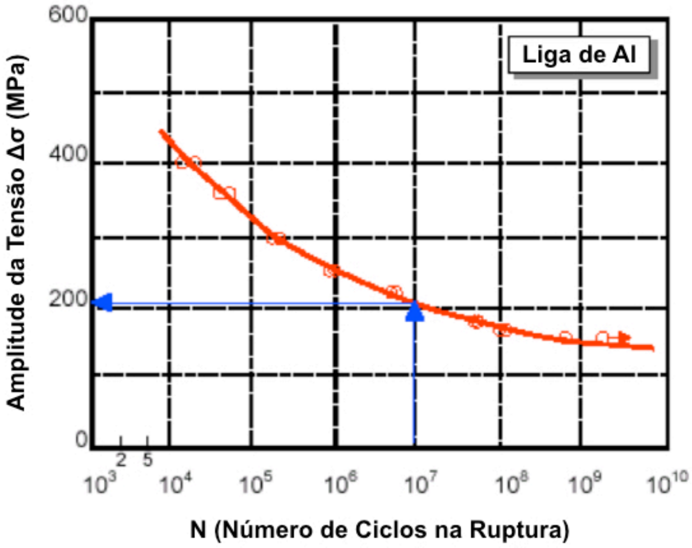
1e

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.

Exercício 2

<table>
<tr>
<td>

2a Utilizando os dados experimentais fornecidos na tabela do exercício, a curva S-N (Diagrama de Wöhler) para a liga considerada pode ser construída.



</td>
<td>

2b

Para obter o valor de σ_L (limite de fadiga), basta ler na curva o valor, para N = 10^7 ciclos. Dessa forma obtemos,

$\sigma_L \cong 205$ MPa.

</td>
</tr>
</table>

Exercício 3

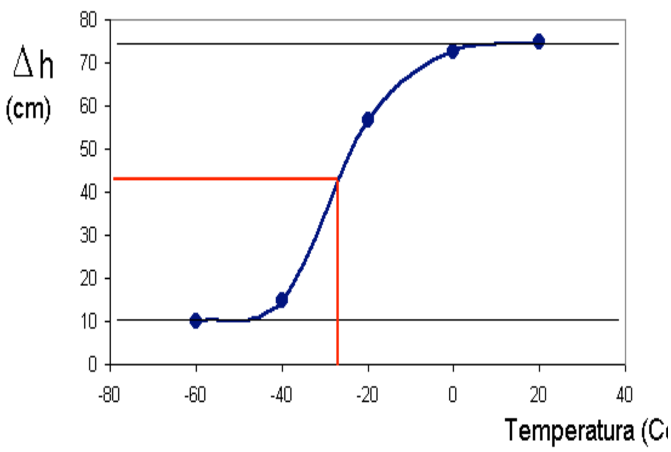
<table>
<tr>
<td>

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

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

Um critério para a determinação da temperatura de transição, corresponde à obtenção do valor médio entre os valores definidos pelo “patamar dúctil” e pelo “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 da temperatura de transição, que é de aproximadamente –27 °C.

</td>
<td>



</td>
</tr>
</table>