

PMT3306 - Mecânica dos Materiais - Prova 1 - Questão 1

A questão 1 a seguir foi resolvida pelo aluno, com calma e consultando o material que achou necessário, e deverá ser entregue no dia 25/09/2018. A entrega deverá ser feita pelo sistema moodle até as 23:55 do dia 25/09. Responda as questões 2 - 4 a seguir. O formulário encontra-se ao final da prova.

Importante: Questões respondidas em branco, ou com resposta insuficiente (por exemplo, enviar recados ao professor ou apenas listar as variáveis do problema) receberão uma penalidade de -1 ponto. Entretanto, qualquer item respondido satisfatoriamente (mesmo que incorreto) elimina a penalidade.

Questões

- 1 . Congratulações! Você se formou e foi contratado(a) para chefiar o laboratório de controle de qualidade de uma empresa de médio porte, mas de alta tecnologia (o laboratório possui dois funcionários, você e um técnico que você ainda não conhece direito). Como uma das suas primeiras tarefas você foi solicitado(a) pelo seu gerente (um engenheiro de materiais formado pela Poli dez anos antes de você) a especificar um corpo de prova e o procedimento de ensaio de tenacidade à fratura no estado plano de deformação (K_{Ic}) segundo a norma ASTM E1820-11 (disponível no moodle) para o material que lhe foi sorteado (novamente, pelo moodle). Consulte a referida norma, bem como a literatura relevante, e prepare um pequeno relatório contendo:
 - a . um croquis do corpo de prova que deverá ser usinado (a partir do produto de que você dispõe, ou seja, barra redonda, quadrada ou placa nas dimensões especificadas), que seja compatível com a norma,
 - b . um tamanho nominal (isto é, que é objetivado) para a pré-trinca de fadiga que deverá ser crescida no CP, compatível com o especificado na norma (o tamanho a ser indicado é o da pré-trinca que vai da raiz do entalhe do corpo de prova até o tamanho nominal da trinca, a , especificado pela norma),
 - c . uma estimativa da **carga** de ruptura (ou seja, não é a tensão de ruptura) e do valor mínimo de CTOD que deveria ser obtido, considerando-se que o CP possui a pré-trinca no tamanho especificado no item anterior e que ele se comporta como um sólido linear elástico,
 - d . um roteiro simplificado para que o técnico responsável do seu laboratório execute o ensaio (não assumo implicitamente que ele é inteligente o suficiente para entender nas entrelinhas o que você quer, ou seja, escreva ordens curtas, no imperativo, que qualquer um consiga seguir) e para que ele calcule os resultados relevantes do mesmo (ou seja, o roteiro deve conter as fórmulas que o técnico usará, usando variáveis que ele medirá na execução do ensaio) e

e . sua estimativa sobre a possibilidade de se obter ou não um resultado válido de K_{Ic} para o CP especificado. Se você concluir que não é possível atingir o estado plano de deformação, indique no seu relatório como o resultado do ensaio deverá ser interpretado.

Dicas:

- Escolha a melhor geometria do CP de acordo com as dimensões e forma do material de que você dispõe, ou seja, o CP deve aproveitar o máximo do material, mas o corpo de prova não pode ter nenhuma dimensão maior que o produto disponível.
- Para o item b, assumo que o técnico já sabe como crescer a pré-trinca de fadiga no material em questão, você não precisa se preocupar com este procedimento, somente deve especificar qual é o comprimento de pré-trinca que deve ser objetivado no ensaio, partindo da raiz do entalhe.
- Para o item c, assumo que o material se comporta como um material elástico linear e que o ensaio é realizado no EPD, colete os dados de K_{Ic} e σ_e para o material a partir da literatura e faça os cálculos necessários.
- O roteiro desejado para o ensaio deve ser conciso e simples, porém completo, para que o técnico possa executar o ensaio e fazer as contas necessárias sem precisar consultar você mais tarde (lembre-se que a pré-trinca pode ter um tamanho diferente do especificado por você).
- Lembre-se que o material pode apresentar deformação plástica significativa durante a execução do ensaio e que, em princípio é possível que o material nem sofra falha catastrófica, ignore este fato e proponha o melhor ensaio linear elástico para o seu caso, mas, se for o caso, comente isso em seu relatório para que seu gerente seja informado. Estime a possibilidade disso acontecer com seu material e faça a recomendação sobre qual parâmetro característico da tenacidade do material será obtido no ensaio.
- Todos os materiais, nas condições de processamento que foram especificadas, tem valores de K_{Ic} e σ_e que podem ser encontrados em livros na biblioteca, mas você pode consultar outras fontes de informação. Em tempo: a fonte de informação, bem como os valores escolhidos, devem ser especificados no relatório.
- Por fim, foi-lhe solicitado **um relatório**, portanto, não se esqueça de se preocupar com a aparência do texto (não precisa ser digitado, mas deve ter uma aparência que não assuste o gerente) e lembre-se de identificar-se como o autor do mesmo, isto é, faça uma capa. O desenho do CP pode ser esquemático e feito à mão, desde que contenha todas as cotas e tolerâncias necessárias para permitir usar o CP (mas se quiser pode usar o CAD e desenhar em escala também). Cada item considerado deve cuidadosamente justificado no relatório e as contas realizadas por você para obter as respostas devem ser explicitamente apresentadas (em princípio seu gerente pode querer checar suas conclusões).

2 . A Figura representada nas folhas em anexo apresenta o resultado de um ensaio de tração executado em corpo de prova idêntico ao ensaiado na aula de laboratório em duas

escalas diferentes. As dimensões do corpo de prova são dadas na própria figura e foram determinadas pelo técnico que executou o ensaio. Elas devem ser usadas para analisar os dados. O ensaio foi realizado com extensômetro. Com base nesses dados determine:

- a. O módulo de Young do material, E (vale 0,5 ponto)
- b. O limite de escoamento com 0,2% de desvio (*offset*), $\sigma_e^{0.002}$ (vale 0,5 ponto)
- c. O limite de resistência, σ_u (vale 0,5 ponto)
- d. O alongamento uniforme, ε_u (vale 0,5 ponto)
- e. O alongamento na fratura, ε_f (vale 0,5 ponto)

Notas:

- Expresse os seus resultados em unidades do SI (outras unidades, mesmo que corretas, reduzem em 50% o valor do item), use $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$ como aceleração da gravidade, caso necessário (mas note que a carga já foi expressa em Newton).
- Lembre-se: as deformações a que se referem os itens d) e e) são deformações **plásticas**.
- Apresente as construções gráficas nas folhas que contém os gráficos e entregue-as junto com sua prova (não se esqueça de escrever seu nome nesta folha, seu número USP também, caso sua caligrafia seja ilegível).

3. O carbeto de silício (SiC) é um composto cerâmico que apresenta múltiplas aplicações na engenharia. O composto apresenta o que se chama de politipia, ou seja, ele pode ser encontrado em múltiplas estruturas cristalinas que estão associadas umas às outras pelo empilhamento de certos conjuntos de planos cristalinos. Um desses politipos, o 3C-SiC (também chamado de β -SiC) apresenta a estrutura cristalina cúbica ($a_0 = 0.43596 \text{ nm}$). Esse composto apresenta propriedades elétricas interessantes (ele é um semicondutor) que o faz ser útil para a microeletrônica de potência. Numa dessas aplicações (um sistema microeletromecânico, *microelectromechanic system*, MEMS) um filme de $100 \mu\text{m}$ de 3C-SiC será crescido epitaxialmente sobre um substrato espesso (2 mm) de Si (cúbico, $a_0 = 0.54311 \text{ nm}$), sendo que o substrato é um monocristal orientado com a direção [001] perpendicular ao plano da superfície e o filme também tem a direção [001] perpendicular ao plano do filme. Sabe-se ainda que os coeficientes de dilatação térmica linear são respectivamente $2,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para o Si e $2,77 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para o 3C-SiC. As propriedades elásticas de monocristais de Si e 3C-SiC são dadas na Tabela 1.

Com base nessas informações, resolva:

- a. Como o filme é muito mais fino que o substrato, este se comporta como uma restrição mecânica sobre o filme. Considere que a área do substrato é grande o suficiente para ele ser considerado um plano infinito e exprima as deformações do filme em função das deformações do substrato. Observação: o referencial das deformações principais é o mesmo, no filme e no substrato, e uma das direções principais já está definida a partir da geometria do sistema, (vale 0,5 ponto)

Tabela 1: Constantes elásticas de monocristais de Si e de 3C-SiC.

Material	C_{11} [GPa]	C_{12} [GPa]	C_{44} [GPa]
Si	166	64	79,6
3C-SiC	395	132	236

- b. O filme é depositado a 1370 °C (ou seja, o sistema é livre de tensões mecânicas nessa temperatura) e depois resfriado à temperatura ambiente (25 °C). Estime o estado de deformação que será imposto ao filme devido à diferença dos coeficientes de dilatação térmica linear entre as duas camadas e expresse o mesmo na forma de um círculo de Mohr das deformações, (vale 0,5 ponto)
- c. Determine a espessura do filme depositado a 1370°C para que ele tenha 100 μ m à temperatura ambiente, (vale 0,5 ponto)
- d. Nível 1 de aproximação: assuma que apenas o filme se encontra sob um estado de tensão (ou seja, despreze o efeito que o filme tem sobre o substrato) e determine as tensões residuais que serão induzidas no filme pelo processo de fabricação, expresse esse estado de tensão na forma de um círculo de Mohr (das tensões). Dica: use a lei de Hooke generalizada, com o estado de deformação deduzido no item b, (vale 0,5 ponto)
- e. Nível 2 de aproximação: para a aplicação que temos em mente necessitamos uma expressão para o módulo efetivo do filme ao longo da espessura (ou seja, a razão $\frac{\sigma_3}{\epsilon_3}$, onde $\sigma_3 = \sigma_3^{3C-SiC} = \sigma_3^{Si}$ é a variável independente), determine uma expressão para esse módulo efetivo no caso em questão. Observação: note que as deformações ao longo do plano estarão sujeitas à restrição imposta pelo substrato, mas, nesse caso, assuma que o substrato também se deforma elasticamente, assumindo que há equilíbrio mecânico entre filme e substrato (ou seja $\sigma_1^{Si} + \sigma_1^{3C-SiC} = \sigma_2^{Si} + \sigma_2^{3C-SiC} = 0$) e que o substrato é espesso, portanto ele está sob EPD ao longo da direção perpendicular ao filme, (vale 0,5 ponto).
4. Schneibel *et al.* (*Intermetallics* **5**, 1997, 185 – 193) mediram tenacidade à fratura em ligas da família Fe – 45 Al – 5X – 0,2 B – 0,1 Zr (com X = Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, os números representam frações molares), os autores ainda estudaram o comportamento de uma liga base, em que nenhum elemento de liga adicional é presente (representando com a condição X = Fe). Para determinar a tenacidade à fratura os autores usaram o corpo de prova de flexão em três pontos com entalhe Chevron (CVN), cuja geometria está apresentada na Figura 1.

Para determinar os resultados os autores usam a expressão:

$$K_Q = \sqrt{\frac{W_f}{A} \times \frac{E}{(1 - \nu^2)}}$$

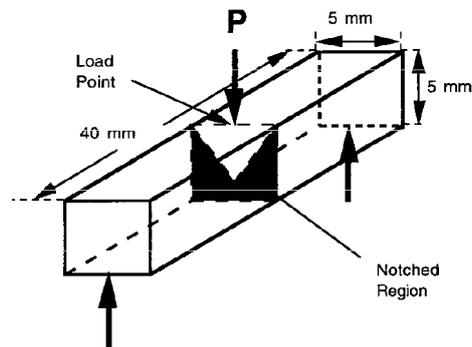


Figura 1: Geometria do ensaio de tenacidade à fratura com corpo de prova CVN.

onde W_f é a energia de fratura medida para 90% de propagação da trinca (90% da área do triângulo na região do ligamento do corpo de prova), obtida integrando a curva Carga \times deslocamento do travessão. A Figura 2 mostra um desses resultados.

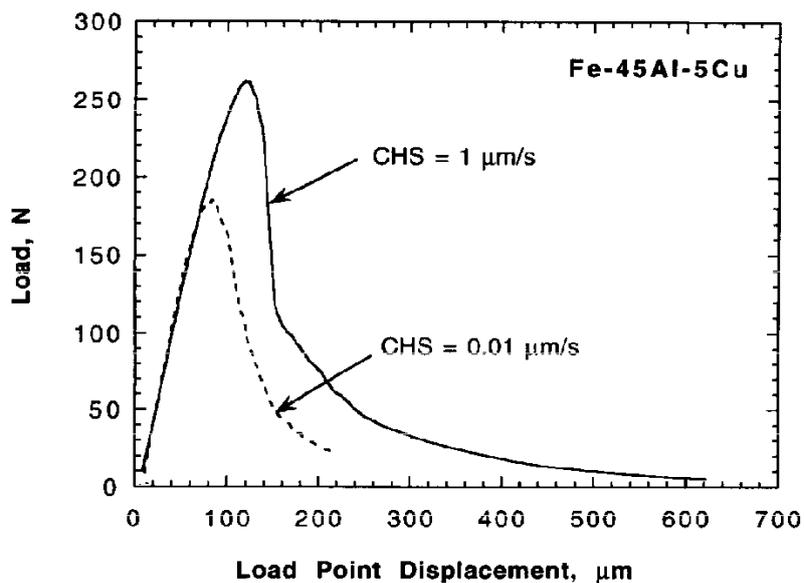


Figura 2: Exemplo de uma curva carga \times deslocamento do travessão (para a liga Fe – 45Al – 5Cu), CHS (*Crosshead speed*) representa a velocidade de deslocamento do travessão durante o ensaio.

Finalmente, os resultados individuais dos ensaios realizados estão representados na Figura 3. Nesse caso os autores identificaram dois regimes, um característico de alta tenacidade,

em que a fratura propaga predominantemente transgranular e outro de baixa tenacidade, em que a fratura propaga predominantemente intergranular.

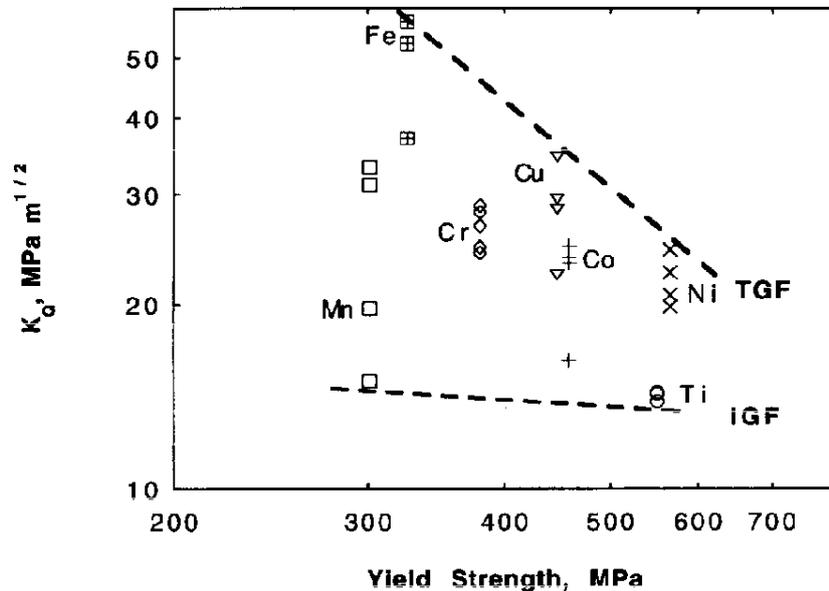


Figura 3: Resultados de tenacidade à fratura para as ligas estudadas em função do limite de escoamento. TGF representa o regime em que a trinca propaga transgranular e IGF representa o regime em que a trinca propaga intergranular.

Com base nesses resultados, resolva:

- Considerando o critério da norma para validade do estado plano de deformação e a geometria do corpo de prova, indique se há (se houver, determine quantos e para quais ligas) ensaios apresentados na Figura 3 que são válidos para determinação de K_{Ic} , (vale 0,5 ponto)
- Analise o comportamento das duas curvas carga \times deslocamento apresentados na Figura 2. O comportamento representado é inesperado, por quê? (vale 0,5 ponto)
- Na sua opinião esses materiais apresentam "comportamento R"? Por quê? (vale 0,5 ponto)
- Discuta a variação da tenacidade nessas ligas em função da composição, há algum tipo de correlação nesses dados? (vale 0,5 ponto)
- Considere os resultados dos ensaios apresentados para as ligas com Mn e com Cr, proponha uma hipótese para explicar a maior dispersão nos resultados das ligas com Mn frente às ligas com Cr? (vale 0,5 ponto).

Formulário

Lei de Hooke generalizada:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 & \sigma_4 & \sigma_5 & \sigma_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Critério de validade para ensaios de tenacidade à fratura no estado plano de deformação:

$$B \geq 2,5 \times \left(\frac{K_Q}{\sigma_e} \right)^2 \quad (2)$$

onde B representa a largura/espessura do corpo de prova.