

# Capítulo 1

## Exercícios - Plastificação, tensões residuais

Prof. Paulo de Tarso R Mendonça,  
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina,  
Departamento de Engenharia Mecânica,  
Grante - Grupo de Análise e Projeto Mecânico, 07/05/2014.

### 1.1 Mecânica dos sólidos B, parte II

#### Exercício 5.1

Considere uma barra de seção circular com um entalhe circular como mostrado na figura, sob um par de torques. Determinar a tensão residual máxima na seção do entalhe, após a aplicação e remoção de um torque 20% superior ao torque de plastificação inicial da barra.  $E = 200$  GPa,  $\sigma_E = 220$  MPa. A barra tem seção circular, com  $r = 3$  mm,  $d = 30$  mm,  $D = 36$  mm. Usar  $K_t = 1,373$  em torção.

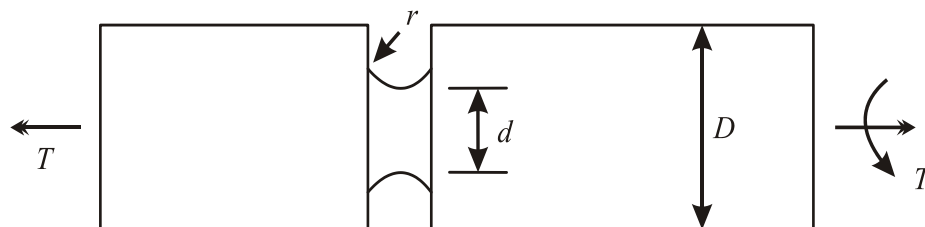


Figura 1.1: Figura Exercício 5.1.

*Solução:*

(a) Torque de plastificação inicial  $T_E$ .

$$T_E = 386,2 \text{ kNmm.}$$

(b) Tensão residual.

$$\tau_r^{\max} = 110 - 120 = -10 \text{ MPa.}$$

**Exercício - 5.2**

Considere uma seção retangular de dimensões  $b \times h = 50 \times 200 \text{ mm}^2$ , submetida a flexão plana. Foi aplicado um extensômetro na direção longitudinal na fibra externa da seção, e em seguida, um momento fletor  $M$  foi aplicado e removido. Durante o carregamento a deformação máxima no extensômetro foi  $\epsilon_e = 0,0015$ .

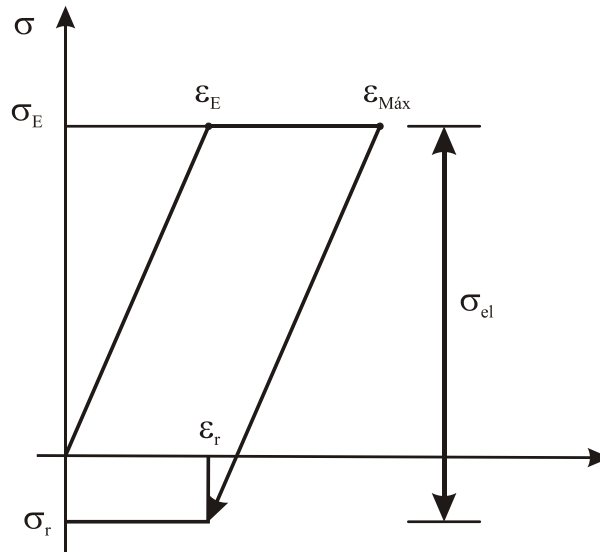
Faça a hipótese de que o aço se comporta como um material elasto-pástico ideal, com  $E = 200 \text{ GPa}$  e  $\sigma_E = 220 \text{ MPa}$ . Determine:

- O momento de início de plastificação de seção;
- Momento fletor aplicado;
- A tensão residual máxima;
- O percentual da seção plastificada no carregamento;
- A deformação residual máxima.

*Solução:*

a)  $M_E = \sigma_E \frac{bh^2}{6} = 73,33 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$ .

b)  $M = 96,81 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$ .



**Figura 1.2:** Figura Exercício 5.2.

c)  $\sigma_r = 220 - 290,43 = -70,43 \text{ MPa}$

d)  $\frac{2c}{h} = 0,200$ .

e) A deformação residual:  $\epsilon_r = \epsilon_e - (\sigma_E - \sigma_r)/E = 0,0015 - (220 + 70,43)/E = \epsilon_r = 47,85 \cdot 10^{-6}$

**Exercício 5.3**

Considere que no exercício 5.2, em vez de medir a deformação no carregamento, o extensômetro tenha registrado apenas a deformação residual de  $\epsilon_r = 200 \cdot 10^{-6}$ . Determine

- Momento fletor aplicado;
- A tensão residual máxima;

- c) O percentual da seção plastificada no carregamento;  
 d) Deformação máxima no carregamento.

*Solução:*

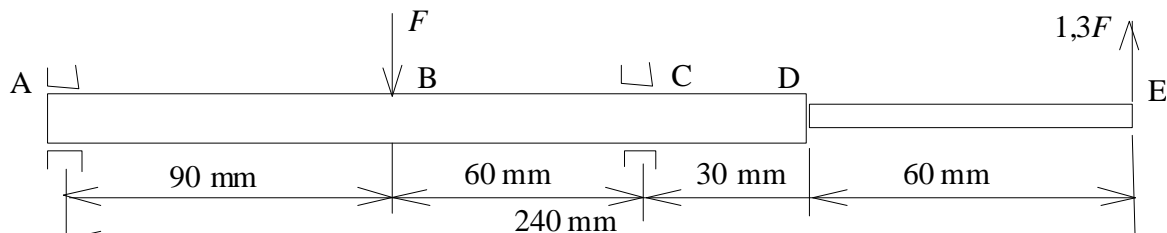
Do diagrama tensão-deformação,

$\frac{\sigma_{el}}{E} = \epsilon_{Max} - \epsilon_r \quad \longrightarrow \quad \frac{\sigma_E - \sigma_r}{E} = \epsilon_{Max} - \epsilon_r \quad \longrightarrow \quad \frac{M/W_f}{E} = \epsilon_{Max} - \epsilon_r$ . Por outro lado, da equação (5.19), temos que  $\frac{\epsilon_{Max}}{\epsilon_E} = \left[ 1 - 2 \left( \frac{M}{M_E} - 1 \right) \right]^{-1/2}$ . Resolvendo o sistema de duas equações para  $\epsilon_{Max}$  e  $M$ , com  $\epsilon_E = \sigma_E/E = 0,00110$  e  $M_E = 73,33 \cdot 10^6$  Nmm, obtém-se a solução dos itens a) e b)..

### Exercício 5.4

Considere o eixo rotativo mostrado na Figura, simplesmente apoiado nas seções A e C, submetido a forças transversais  $F$  e  $1,3F$ . Tensão de início de escoamento é  $\sigma_E = 220$  MPa, a tensão limite de ruptura é  $\sigma_E = 400$  MPa. A barra tem seção circular, com diâmetros  $d = 28$  mm,  $D = 36$  mm. O entalhe na seção D tem  $r = 3$  mm e  $K_{tfl} = 1,5$  em flexão, baseado na área mínima da seção. O fator de sensibilidade ao entalhe é  $q_R = 0,5$ . O fator de forma da seção circular em flexão é  $k = 1,7$ .

- (a) Determine a força  $F$  que leva o início de escoamento na viga. Para isso identifique a seção crítica analisado três seções.  
 (b) Determine a força  $F$  que leva à ruptura dúctil a seção do entalhe.  
 (c) Determine a força de plastificação total de seção,  $F_p$ ;  
 (d) Determine a tensão residual máxima na seção do entalhe, após a aplicação e remoção de forças dadas por  $F = 6$  kN.



**Figura 1.3:** Figura do Exercício 5.4.

*Solução:*

Os esforços de momento fletor são:  $M_B = 106,2F$ ,  $M_C = 117,0F$ ,  $M_D = 78,0F$ .

- (a) Início de escoamento.

Análise da seção B:

$$W_f = \frac{\pi D^3}{32} = 4580,4 \text{ mm}^3,$$

$$\sigma_E = \frac{M_B}{W_f} \quad \longrightarrow \quad 220 = \frac{106,2F_E}{4580,4} \quad \longrightarrow \quad F_E = 9489 \text{ N.}$$

Análise da seção C:

$$W_f = \frac{\pi D^3}{32} = 4580,4 \text{ mm}^3,$$

$$\sigma_E = \frac{M_C}{W_f} \quad \longrightarrow \quad 220 = \frac{117,0F_C}{4580,4} \quad \longrightarrow \quad F_C = 8612,7 \text{ N.}$$

Análise da seção D:

$$W_f = \frac{\pi d^3}{32} = 2155 \text{ mm}^3,$$

$$\sigma_E = K_{tfl} \frac{M_D}{W_f} \rightarrow 220 = 1,5 \frac{78,0 F_D}{2155} \rightarrow \boxed{F_D = 4052 \text{ N} \leftarrow \text{É a seção crítica!}}$$

(b) Força  $F$  que leva à ruptura dúctil. Considerar seção D.

Por definição,  $K_R = \frac{\sigma_R}{\sigma_{oR}}$ .

$$K_R = 1 + q_R(K_{tfl} - 1) = 1,25.$$

$$\sigma_{oR} = \frac{78,0 F_R}{W_f} = \frac{78,0 F_R}{2155} \rightarrow K_R \sigma_{oR} = \sigma_R \rightarrow 1,25 \frac{78,0 F_R}{2155} = 400 \rightarrow \boxed{F_R = 8841 \text{ N}}$$

(c) Força de plastificação total de seção,  $F_p$ . Considerar seção D.

Como existe entalhe na seção, o fator de forma deve ser modificado da seguinte forma:

$$M_p = k K_{tfl} M_E \rightarrow M_p = k K_{tfl} 78,0 F_D \rightarrow M_p = 1,7 \times 1,5 \times 78,0 \times 4052 = 805,94 \text{ kNmm}.$$

Logo, como  $M_p = 78,0 F_p$ , temos  $F_p = 10333 \text{ N}$ .

(d) Determine a tensão residual máxima para  $F = 6 \text{ kN}$ . Considerar seção D.

$$\sigma_r = \sigma_E - K_{tfl} \frac{M_C}{W_f} = \sigma_E - K_{tfl} \frac{78,0 F}{W_f} \rightarrow \sigma_r = 220 - 1,5 \frac{78,0 \times 6000}{2155} = 220 - 325,8 = -105,8$$

MPa.

### Exercício 5.5

Responda de forma objetiva, usando no máximo 10 linhas:

- Explique o que é concentração de tensão.
- O que é fator de concentração de tensão? Quais são os pressupostos para seu uso?
- Explique o que é curva tensão-deformação real e de engenharia;
- Defina modos de falha: (i) por início de escoamento; (ii) por colapso plástico; (iii) por ruptura frágil e dúctil.