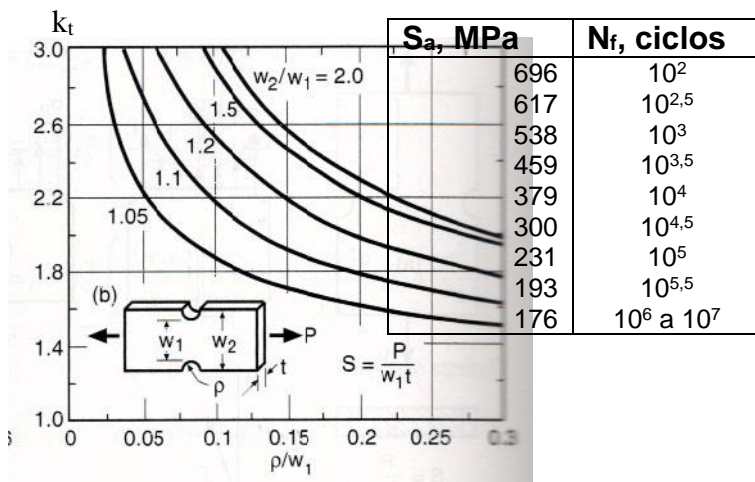


# ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

## Departamento de Engenharia de Materiais

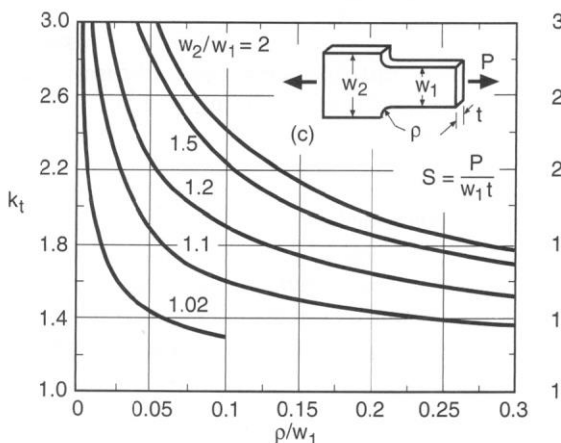
### SMM 156 - Fadiga e Fratura dos Materiais – 1ª lista de Exercícios

1) Os dados de fadiga em carregamentos completamente reversos foram obtidos a partir de corpos de prova entalhados conforme figura abaixo, fabricados a partir do aço AISI4340. Alguns pontos da curva S-N são dados na Tabela abaixo. Note que a superfície do entalhe é polida. Estime a curva S-N de acordo com os procedimentos de Juvinal. Avalie se a curva estimada obtida representa os dados obtidos dos ensaios. (Considere que um bom ajuste requer um erro menor do que 10%). Dados:  $\rho = 2,54$  mm;  $w_2 = 25,4$  mm,  $t = 6,35$ . Limite de escoamento 646 MPa; limite de resistência = 786 MPa



2) Uma peça estrutural de avião é fabricada de aço Man-Ten com geometria similar ao da Figura abaixo. Foi definido em projeto que ela deve suportar uma vida de  $10^6$  ciclos quando submetida a um carregamento cíclico axial de amplitude  $P_a = 16$  kN e um carga constante de 9 kN. As dimensões da placa são:  $w_1 = 20$ ;  $w_2 = 24$ ;  $t = 10$  e  $\rho = 0,5$  mm. O entalhe tem acabamento de retífica.

- a) Qual é o fator de segurança em tensão.
- b) Se é esperado um fator de segurança em tensão de 1,8, qual seria o valor do raio do entalhe que as exigências de projeto fossem atendidas.



3) (3,0) Uma liga de Al 2024 – T4 foi ensaiada em fadiga utilizando corpos de prova sem entalhes, em carregamentos axiais com tensão média igual a zero ( $R=-1$ ).

AI 2024 – T4	
Amplitude de Tensão, MPa	Nº de Ciclos
379	8.000
345	13.100
276	53.000
207	306.000
172	1.169.000

- a) Coloque os dados em coordenadas log-log e correlacione a amplitude de tensão com a vida em fadiga obtendo as constantes deste material. Comente os resultados.
- b) Uma peça foi fabricada deste material e será submetida em serviço a uma amplitude de tensão de 250 MPa sendo desejada uma vida em serviço de 30.000 ciclos. Qual é o fator de segurança em vida e em tensão.

Para este mesmo material foram obtidas diferentes combinações de  $\sigma_{max}$  e R e os valores são apresentados na tabela abaixo.

AI 2024 – T4		
$\sigma_{max}$ , MPa	R	Ciclos para falhar
469	0,6	252.000
459	0,6	520.000
448	0,4	85.000
414	0,4	144.000
372	0,4	351.000
345	0,4	701.000
448	0,02	30.000
386	0,02	60.000
362	0,02	85.000
310	0,02	156.000
260	0,02	355.000
414	-0,3	24.000
310	-0,3	132.000
448	-0,6	6.200
190	-0,6	546.000

- c) Utilizando a relação SWT calcule  $\sigma_{ar}$  para os dados da acima e coloque em gráfico versus  $N_f$ . Adicione os dados do item a) e comente o resultado.

4) Ensaio de fadiga em controle de deformação de um aço com  $E = 202$  GPa resultou nos seguintes dados:

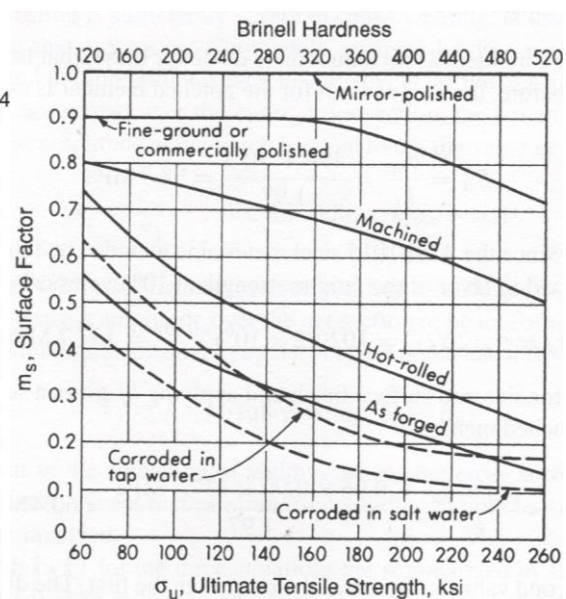
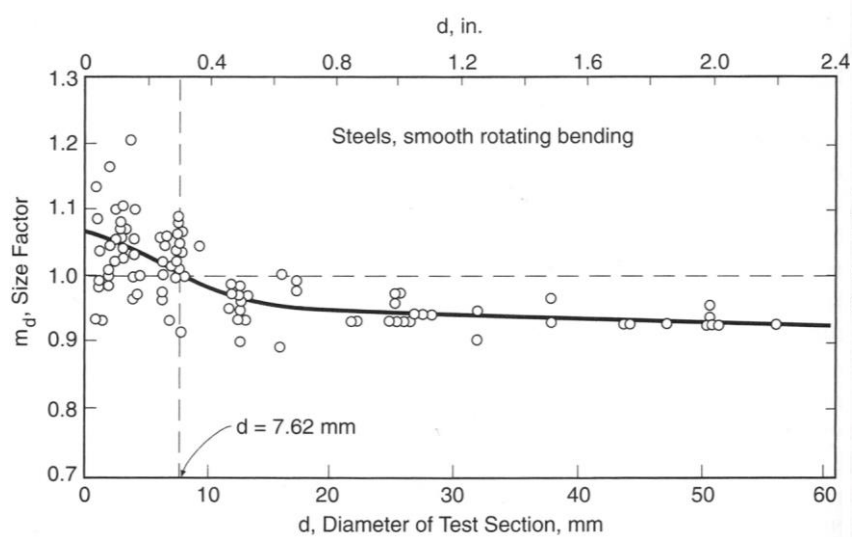
Amplitude total de Deformação	Amplitude de Tensão, MPa	Número de reversos para falhar, 2Nf
0,0200	524	257
0,0100	459	1494
0,0060	410	6749
0,0040	352	19090
0,0030	315	36930
0,0020	270	321500
0,0015	241	2451000

- (a) Determine as propriedades de deformação-vida ( $\sigma'_f$ ,  $\epsilon'_f$ ,  $b$  e  $c$ ) para este material.
- (b) Determine o coeficiente de resistência cíclica,  $K'$ , e o coeficiente de encruamento cíclico,  $n'$ .
- (c) Esquematize a histerese estabilizada para uma amplitude de deformação de 0,006.

4) Determine a equação de Deformação – Vida para o aço especificado como RQC-100, cujos dados experimentais obtidos nos ensaios de fadiga de baixo ciclo estão apresentados na tabela abaixo. Dado:  $E = 206 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_y = 683 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_u = 758 \text{ MPa}$ .

$\Delta\varepsilon/2$	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	$2N_f$
0,04	1100	60
0,02	985	310
0,01	895	1380
0,006	820	3560
0,004	750	9100

(d)



Constantes para a curva Tensão-Vida para alguns metais, ensaiados em fadiga com tensão média zero e corpos de prova não entalhados e carregamentos axiais

Material	Limite de escoamento	Limite de resistência	Tensão Verd. de fratura	$\sigma_a = \sigma'_f(2N_f)^b = AN_f^B$		
	$\sigma_o$	$\sigma_u$	$\tilde{\sigma}_{fB}$	$\sigma'_f$	A	b = B
<i>(a) Steels</i>						
SAE 1015 (normalized)	228 (33)	415 (60.2)	726 (105)	1020 (148)	927 (134)	-0.138
Man-Ten (hot rolled)	322 (46.7)	557 (80.8)	990 (144)	1089 (158)	1006 (146)	-0.115
RQC-100 (roller Q & T)	683 (99.0)	758 (110)	1186 (172)	938 (136)	897 (131)	-0.0648
AISI 4142 (Q & T, 450 HB)	1584 (230)	1757 (255)	1998 (290)	1937 (281)	1837 (266)	-0.0762
AISI 4340 (aircraft quality)	1103 (160)	1172 (170)	1634 (237)	1758 (255)	1643 (238)	-0.0977
<i>(b) Other Metals</i>						
2024-T4 Al	303 (44.0)	476 (69.0)	631 (91.5)	900 (131)	839 (122)	-0.102
Ti-6Al-4V (solution treated and aged)	1185 (172)	1233 (179)	1717 (249)	2030 (295)	1889 (274)	-0.104

Os valores da tabela tem unidades em MPa (ksi) exceto para as unidades adimensionais b=B

**Goodman:**  $\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$       **Gerber:**  $\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1$       **Morrow:**  $\frac{\sigma_a}{\sigma_{ar}} + \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} = 1$

**SWT:**  $\sigma_{ar} = \sqrt{\sigma_{max} \sigma_a} \dots (\sigma_{max} > 0)$   
 $\sigma_{ar} = \sigma_{max} \sqrt{\frac{1-R}{2}} \dots (\sigma_{max} > 0)$

**Walker:**  $\sigma_{ar} = \sigma_{max}^{1-\gamma} \sigma_a^\gamma \dots (\sigma_{max} > 0)$   
 $\sigma_{ar} = \sigma_{max} \left(\frac{1-R}{2}\right)^\gamma \dots (\sigma_{max} > 0)$

$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K'}\right)^{1/n'}$        $\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2K'}\right)^{1/n'}$        $\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$

$K' = \frac{\sigma'_f}{(\epsilon'_f)^{n'}}$        $n' = \frac{b}{c}$        $\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$        $\frac{\Delta\epsilon}{2} = \epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N^*)^b + \epsilon'_f (2N^*)^c$

$N_f = N^* \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right)^{-1/b}$        $\frac{\Delta\epsilon}{2} = \epsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right) (2N_f)^b + \epsilon'_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right)^{c/b} (2N_f)^c$

$\sigma_{max} \epsilon_a = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c}$

Aço

$$\log \beta = -1,079 \times 10^{-9} \sigma_u^3 + 2,74 \times 10^{-6} \sigma_u^2 - 3,74 \times 10^{-3} \sigma_u + 0,6404$$

$$345 \leq \sigma_u \leq 1725 \text{MPa}$$

Alumínio

$$\log \beta = -9,402 \times 10^{-9} \sigma_u^3 + 1,422 \times 10^{-5} \sigma_u^2 - 8,249 \times 10^{-3} \sigma_u + 1,451$$

$$345 \leq \sigma_u \leq 1725 \text{MPa}$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\beta / \rho}} \quad q = \frac{1}{1 + \sqrt{\beta / \rho}}$$

$$S_{ar} = \frac{\sigma_{ar}}{k_f} = \frac{S_a}{1 - \frac{S_m}{\sigma_u}} \quad S_{ar} = \frac{\sigma_{ar}}{k_f} = \sqrt{S_{\max} S_a} = S_{\max} \sqrt{\frac{1-R}{2}} \quad S_{ar} = \frac{\sigma_{ar}}{k_f} = S_{\max}^{1-\gamma} S_a^\gamma = S_{\max} \left( \frac{1-R}{2} \right)^\gamma$$

Parameters for Estimating Fatigue Limits

Parameter	Applicability	Juvinall (2000)	Shigley (2004)
Bending fatigue limit factor: $m_e$	Steels, $\sigma_u \leq 1460$ MPa	0.5	0.504
	High-strength steels	$\leq 0.5$	$\sigma_{erb} \leq 740$ MPa
	Cast irons; Al alloys if $\sigma_u \leq 325$ MPa	0.4	—
	Higher strength Al Magnesium alloys	$\sigma_{erb} = 130$ MPa 0.35	— —
Load type factor: $m_t$	Bending	1.0	1.0
	Axial	1.0	0.85
	Torsion	0.58	0.59
Size (stress gradient) factor: $m_d$	Bending or torsion <sup>1,2,3</sup>	1.0 ( $d < 10$ mm)	$1.24d^{-0.107}$
		0.9 ( $10 \leq d < 50$ )	( $3 \leq d \leq 51$ mm)
	Axial, concentric load	0.9 ( $d < 50$ )	1.0
	Axial, eccentric load	0.7 to 0.9 ( $d < 50$ )	1.0
Surface finish factor: $m_s$	Polished	1.0	1.0
	Ground <sup>4</sup>	See Fig. 10.10	$1.58\sigma_u^{-0.085}$
	Machined <sup>4</sup>	See Fig. 10.10	$4.51\sigma_u^{-0.265}$
Life for fatigue limit point: $N_e$ , cycles	Steels, cast irons	$10^6$	$10^6$
	Aluminum alloys	$5 \times 10^8$	—
	Magnesium alloys	$10^8$	—

Notes: <sup>1</sup>Diameter  $d$  is in mm units. <sup>2</sup>For Juvinall, for  $50 \leq d < 100$  mm, decrease the values of  $m_d$  by 0.1 relative to the values for  $d < 50$  mm, and for  $100 \leq d < 150$  mm decrease by 0.2. <sup>3</sup>For Shigley, for bending and torsion, use  $1.51d^{-0.157}$  for  $51 < d \leq 254$  mm, and for nonrotating bending, replace  $d$  with  $d_e = 0.37d$  for round sections, and with  $d_e = 0.81\sqrt{ht}$  for rectangular sections (Fig. A.2). <sup>4</sup>For Shigley, substitute  $\sigma_u$  in MPa.

Table 10.2 Estimates of the S-N Curve Point at  $10^3$  Cycles

Juvinall (2000) <sup>1</sup>	$m' = 0.9, k'_f = k_f$ (bending; torsion with $\tau_u$ replacing $\sigma_u$ )
	$m' = 0.75, k'_f = k_f$ (axial)
Shigley (2004) <sup>2</sup> (steel only)	$m' = \frac{\sigma'_f(2000)^{b'}}{\sigma_u}, \quad b' = -\frac{\log(\sigma'_f/\sigma_{er})}{\log(2N_e)}$
	$k'_f = 1 + (k_f - 1)(-0.18 + 6.24 \times 10^{-4}\sigma_u - 9.47 \times 10^{-8}\sigma_u^2)$ ( $\sigma_u$ in MPa)

Notes: <sup>1</sup>Use the estimate  $\tau_u \approx 0.8\sigma_u$  for steel, and  $\tau_u \approx 0.7\sigma_u$  for other ductile metals. <sup>2</sup>Use the estimate  $\sigma'_f \approx \sigma_u + 345$  MPa for steel with  $\sigma_u \leq 1700$  MPa.

## Constantes relativa a Tensão - Deformação Ciclicas e Deformação - Vida

Material	Source	Tensile Properties				Cyclic $\sigma$ - $\epsilon$ Curve			Strain-Life Curve			
		$\sigma_o$	$\sigma_u$	$\bar{\sigma}_{fB}$	% RA	E	H'	n'	$\sigma'_f$	b	$\epsilon'_f$	c
<i>(a) Steels</i>												
SAE 1015 (normalized)	(8)	228 (33.0)	415 (60.2)	726 (105)	68	207,000 (30,000)	1349 (196)	0.282	1020 (148)	-0.138	0.439	-0.513
Man-Ten <sup>2</sup> (hot rolled)	(7)	322 (46.7)	557 (80.8)	990 (144)	67	203,000 (29,500)	1096 (159)	0.187	1089 (158)	-0.115	0.912	-0.606
RQC-100 (roller Q & T)	(2)	683 (99.0)	758 (110)	1186 (172)	64	200,000 (29,000)	903 (131)	0.0905	938 (136)	-0.0648	1.38	-0.704
SAE 1045 (HR & norm.)	(6)	382 (55.4)	621 (90.1)	985 (143)	51	202,000 (29,400)	1258 (182)	0.208	948 (137)	-0.092	0.260	-0.445
SAE 4142 (As Q, 670 HB)	(1)	1619 (235)	2450 (355)	2580 (375)	6	200,000 (29,000)	2810 (407)	0.040	2550 (370)	-0.0778	0.0032	-0.436
SAE 4142 (Q & T, 560 HB)	(1)	1688 (245)	2240 (325)	2650 (385)	27	207,000 (30,000)	4140 (600)	0.126	3410 (494)	-0.121	0.0732	-0.805
SAE 4142 (Q & T, 450 HB)	(1)	1584 (230)	1757 (255)	1998 (290)	42	207,000 (30,000)	2080 (302)	0.093	1937 (281)	-0.0762	0.706	-0.869
SAE 4142 (Q & T, 380 HB)	(1)	1378 (200)	1413 (205)	1826 (265)	48	207,000 (30,000)	2210 (321)	0.133	2140 (311)	-0.0944	0.637	-0.761
AISI 4340 <sup>2</sup> (Aircraft Qual.)	(3)	1103 (160)	1172 (170)	1634 (237)	56	207,000 (30,000)	1655 (240)	0.131	1758 (255)	-0.0977	2.12	-0.774
AISI 4340 (409 HB)	(1)	1371 (199)	1468 (213)	1557 (226)	38	200,000 (29,000)	1910 (277)	0.123	1879 (273)	-0.0859	0.640	-0.636
Ausformed H-11 (660 HB)	(1)	2030 (295)	2580 (375)	3170 (460)	33	207,000 (30,000)	3475 (504)	0.059	3810 (553)	-0.0928	0.0743	-0.7144
<i>(b) Other Metals</i>												
2024-T351 Al	(1)	379 (55.0)	455 (66.0)	558 (81.0)	25	73,100 (10,600)	662 (96.0)	0.070	927 (134)	-0.113	0.409	-0.713
2024-T4 Al <sup>3</sup> (Prestrained)	(4)	303 (44.0)	476 (69.0)	631 (91.5)	35	73,100 (10,600)	738 (107)	0.080	1294 (188)	-0.142	0.327	-0.645
7075-T6 Al	(5)	469 (68.0)	578 (84)	744 (108)	33	71,000 (10,300)	977 (142)	0.106	1466 (213)	-0.143	0.262	-0.619
Ti-6Al-4V (soln. tr. & age)	(1)	1185 (172)	1233 (179)	1717 (249)	41	117,000 (17,000)	1772 (257)	0.106	2030 (295)	-0.104	0.841	-0.688
Inconel X (Ni base, annl.)	(1)	703 (102)	1213 (176)	1309 (190)	20	214,000 (31,000)	1855 (269)	0.120	2255 (327)	-0.117	1.16	-0.749

Notes: <sup>1</sup>The tabulated values either have units of MPa (ksi), or they are dimensionless. <sup>2</sup>Test specimens prestrained, except at short lives, also periodically overstrained at long lives. <sup>3</sup>For nonprestrained tests, use same constants, except  $\sigma'_f = 900(131)$  and  $b = -0.102$ .

Sources: Data in (1) [Conle 84]; (2) author's data on the ASTM Committee E9 material; (3) [Dowling 73]; (4) [Dowling 89] and [Topper 70]; (5) [Endo 69] and [Raske 72]; (6) [Leese 85]; (7) [Wetzel 77] pp. 41 and 66; (8) [Keshavan 67] and [Smith 70].

