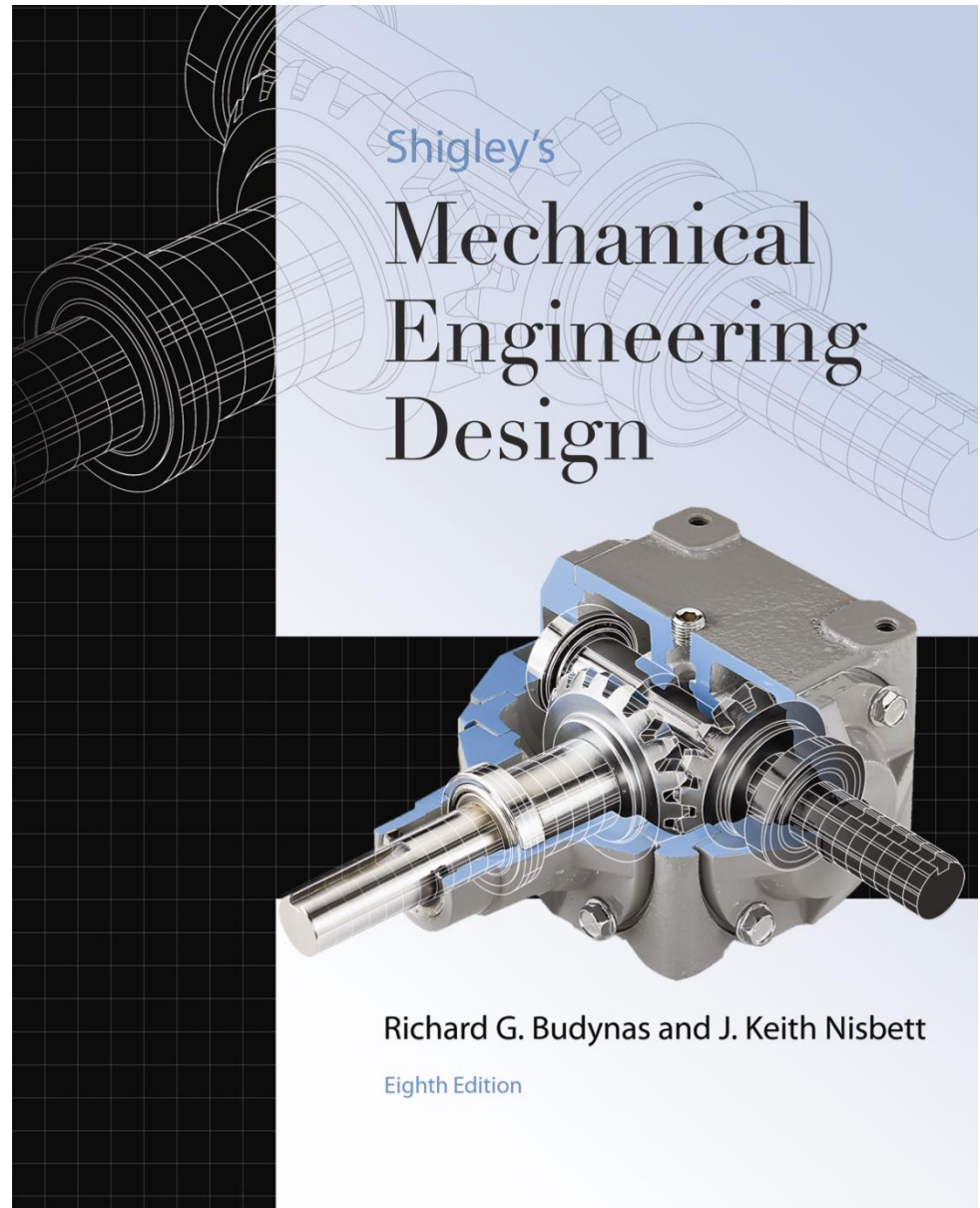


# Capítulo 9

# Soldagem, união e projeto de uniões permanentes Parte 2



Shigley's

Mechanical  
Engineering  
Design

Richard G. Budynas and J. Keith Nisbett

Eighth Edition

# 9

## Soldagem, união e o projeto de junções permanentes

<b>9-1</b>	Símbolos de soldagem	<b>484</b>
<b>9-2</b>	Soldas de topo e filete	<b>486</b>
<b>9-3</b>	Tensões em junções soldadas em torção	<b>490</b>
<b>9-4</b>	Tensões em junções soldadas em flexão	<b>495</b>
<b>9-5</b>	A resistência de junções soldadas	<b>497</b>
<b>9-6</b>	Carregamento estático	<b>500</b>
<b>9-7</b>	Carregamento de fadiga	<b>504</b>
<b>9-8</b>	Soldagem de resistência	<b>506</b>
<b>9-9</b>	União por adesivo	<b>506</b>

## 9-5 A resistência de junções soldadas

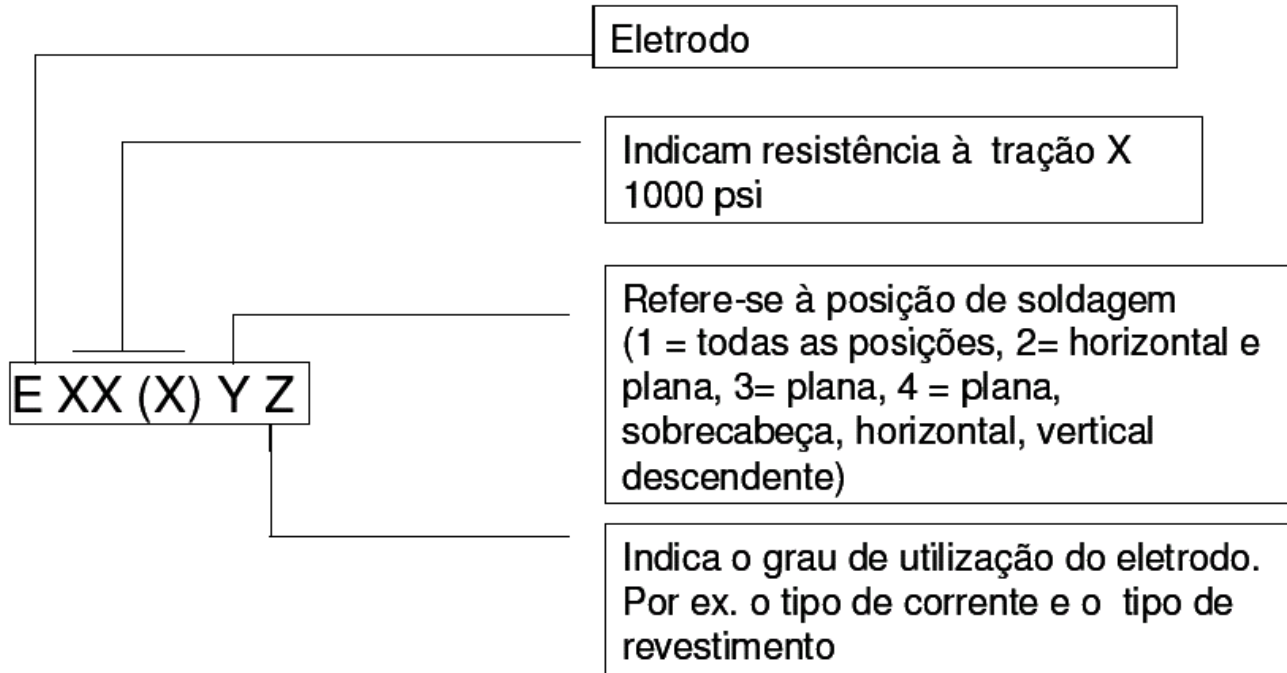
### Tabela 9-3

Propriedades mínimas metal-solda.

Número de eletrodo AWS*	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)	Elongação porcentual
E60xx	427	345	17-25
E70xx	482	393	22
E80xx	551	462	19
E90xx	620	531	14-17
E100xx	689	600	13-16
E120xx	827	737	14

\* Sistema de numeração de especificação do código da American Welding Society (AWS). Esse sistema utiliza um E prefixado a um sistema de numeração de 4 a 5 dígitos nos quais os dois ou três primeiros dígitos designam a resistência à tração aproximada. O último dígito inclui variáveis na técnica de soldagem, tal como o suprimento de corrente. Os dígitos próximos ao último indicam a posição de soldagem, como, por exemplo, plana, vertical ou suspensa (sobre a cabeça). O conjunto completo de especificações pode ser obtido da AWS por meio de requisição.

# ESPECIFICAÇÃO AWS



## 9-5 A resistência de junções soldadas

### Tabela 9-4

Tensões permitidas pela Norma AISC para metal de solda.

Tipo de carregamento	Tipo de solda	Tensão permissível	$n^*$
Tração	Topo	$0,60S_y$	1,67
Suporte	Topo	$0,90S_y$	1,11
Flexão	Topo	$0,60-0,66S_y$	1,52-1,67
Compressão simples	Topo	$0,60S_y$	1,67
Cisalhamento	Topo ou filete	$0,30S_{ut}^\dagger$	

\*O fator de segurança  $n$  foi computado usando a teoria de energia de distorção.

† A tensão de cisalhamento no metal de base não excederá  $0,40S_y$  do metal de base.

## 9-5 A resistência de junções soldadas

### Tabela 9-5

Fatores de concentração de tensão de fadiga,  $K_{fs}$ .

Tipo de solda	$K_{fs}$
Solda de topo reforçada	1,2
Ponta de solda de filete transversal	1,5
Extremidade de solda paralela	2,7
Junção em topo-T com cantos aguçados	2,0

## Tabela 9-6

Cargas estáveis permitidas e tamanhos mínimos de solda de filete.

### Lista A: Carga permitida para vários tamanhos de soldas de filete

Nível de resistência do metal de solda (EXX)							
	60*	70*	80	90*	100	110*	120
Tensão de cisalhamento permitida (MPa) na garganta de solda de filete ou solda de entalhe de penetração parcial							
$\tau =$	124	145	165	186	207	228	248
Força unitária permitida em solda de filete, N/m							
$\dagger f =$	87,67h	102,52h	116,66h	131,5h	146,35h	161,2h	175,34h
Tamanho de perna h, mm	Força unitária permitida para vários tamanhos de soldas de filete N/m						
		mm					
25	2 192	2 563	2 916	3 288	3 659	4 030	4 383
22	1 929	2 255	2 566	2 893	3 220	3 546	3 857
20	1 753	2 050	2 333	2 630	2 927	3 224	3 506
16	1 403	1 640	1 866	2 104	2 342	2 579	2 805
12	1 052	1 230	1 400	1 578	1 756	1 934	2 104
11	964	1 127	1 283	1 447	1 610	1 773	1 927
10	877	1 025	1 167	1 315	1 463	1 612	1 753
8	701	820	933	1 052	1 171	1 290	1 403
6	526	615	700	789	878	967	1 052
5	438	513	583	658	732	806	877
3	263	308	350	395	439	484	526
2	175	205	233	263	293	322	351

\* Soldas de filete realmente ensaiadas pelo Comitê de Trabalho Conjunto da AISC-AWS.

$$\dagger f = 0,707 h \tau_{all}$$

### Lista B: Tamanho mínimo de solda de filete, h

Espessura do material da parte unida mais espessa, mm		Tamanho de solda, mm
*Até 6 incl.		3
Acima de 6	Até 12	5
Acima de 12	Até 20	6
†Acima de 20	Até 38	8
Acima de 38	Até 58	10
Acima de 58	Até 150	12
Acima de 150		16

Não exceder a espessura da parte mais fina.

\*Tamanho mínimo para aplicação em pontes não atinge valor inferior a 5 mm.

†Para tamanho mínimo de solda de filete, a lista não ultrapassa a medida de 8 mm de solda de filete para cada 20 mm de material.

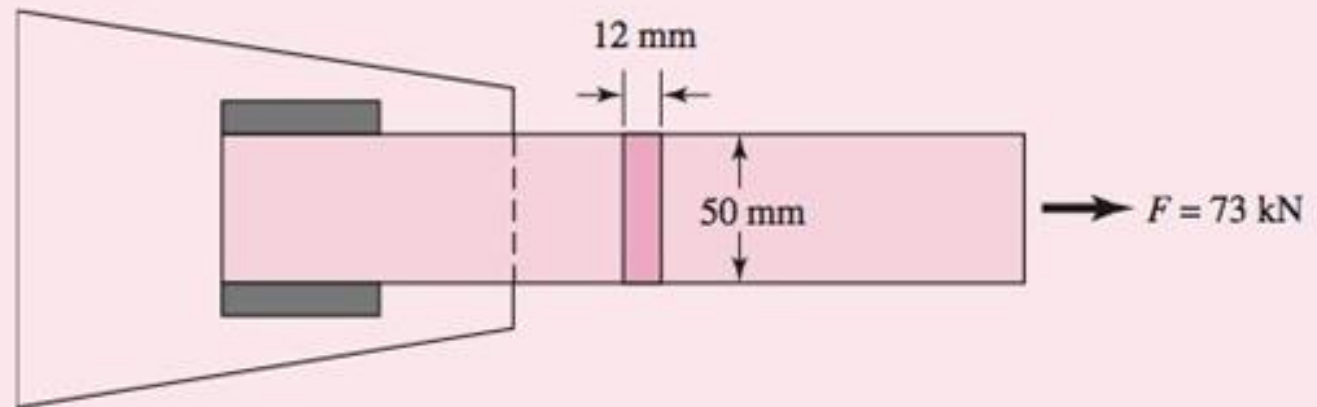
## EXEMPLO 9-2

Uma barra de aço 1015 de seção transversal retangular de 12 mm por 50 mm carrega uma carga estática de 73 kN. É soldada a uma chapa de reforço com uma solda de filete de 10 mm com comprimento de 50 mm em ambos os lados, com um eletrodo E70XX, como representado na Figura 9-18. Use o método do código de soldagem.

(a) É satisfatória a resistência do metal de solda?

(b) É satisfatória a resistência da fixação?

| **Figura 9-18**



### Solução

(a) Com base na Tabela 9-6, a força admissível por unidade de comprimento para um eletrodo de metal E70 de 10 mm é  $1025 \text{ N/mm}$  de soldadura; assim

$$F = 1025 \cdot l = 1025 \cdot 100 = 102500 \text{ N} = 102,5 \text{ kN}$$

Sendo  $102,5 > 73 \text{ kN}$ , a resistência do metal da solda é satisfatória.



(b) Verifique o cisalhamento na fixação adjacente às soldas. De acordo com a Tabela 9-4 e a Tabela A-18, da qual  $S_y = 190$  MPa, a tensão de cisalhamento permissível da fixação é

$$\tau_{\text{all}} = 0,4S_y = 0,4(190) = 76 \text{ MPa}$$

A tensão de cisalhamento  $\tau$  na base de metal adjacente à solda é

$$\tau = \frac{F}{2hl} = \frac{73\,000}{2(0,01)(0,05)} = 73 \text{ MPa}$$

Sendo  $\tau_{\text{all}} \geq \tau$ , a fixação é satisfatória próximo às contas de solda. A tensão de tração na perna da fixação  $\sigma$  é

$$\sigma = \frac{F}{tl} = \frac{73\,000}{(0,012)(0,05)} = 122 \text{ MPa}$$

A tensão de tração admissível  $\sigma_{\text{all}}$ , da Tabela 9-4, é  $0,6S_y$  e preservando o nível de segurança do código de soldagem,

$$\sigma_{\text{all}} = 0,6S_y = 0,6(190) = 114 \text{ MPa}$$

Sendo  $\sigma_{\text{all}} < \sigma$ , a tensão de tração de perna é insatisfatória.

### Tabela A-18

Resistências determinísticas da ASTM mínimas de tração e de escoamento para aços laminados a quente (HR) e estirados a frio (CD).

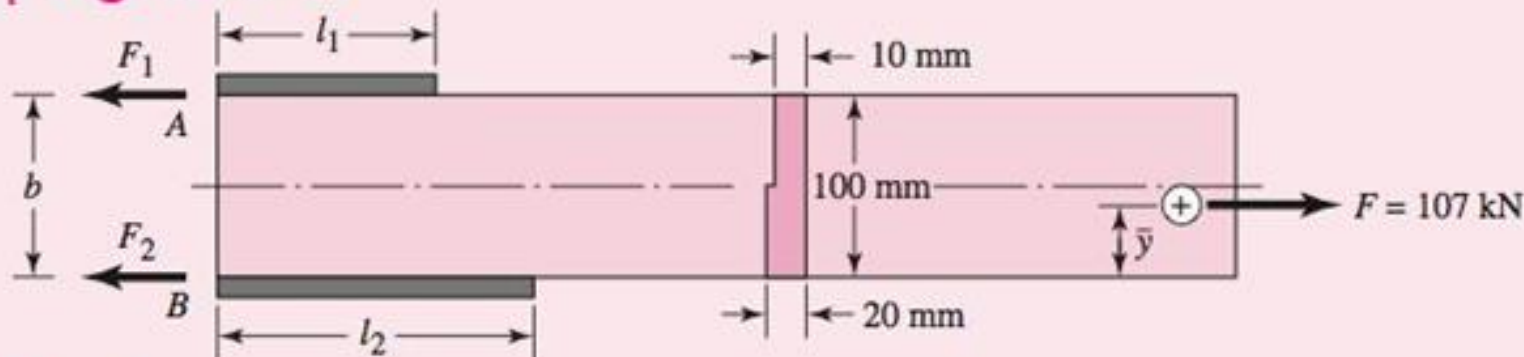
[As resistências listadas são valores mínimos estimados da ASTM no intervalo de medida de 18 a 32 mm ( $\frac{3}{4}$  a  $1\frac{1}{4}$  in). Estas resistências são apropriadas para uso com o fator de projeto definido na Seção 1-10, provido que os materiais conformem aos requisitos da ASTM A6 ou A568 ou são requeridos em especificações de compra. Lembre que um sistema de numeração não é uma especificação.] Fonte: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS nº	Nº SAE e/ou AISI	Processamento	Resistência à tração MPa (Kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (Kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Redução em área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27,5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37,5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39,5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49,5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61,5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

### EXEMPLO 9-3

Uma seção de aço estrutural A36 especialmente laminada para fixação tem uma seção transversal, como mostrado na Figura 9-19, e resistência ao escoamento e resistência máxima à tração de 248 e 483 MPa respectivamente. É estaticamente carregada pelo centroide da fixação com uma carga de  $F = 107$  kN. Filetes de solda não simétricos podem compensar através da excentricidade, tal que não existe momento a ser resistido pelas soldas. Especifique os comprimentos dos filetes de solda  $l_1$  e  $l_2$  para uma solda de filete de 8 mm usando um eletrodo E70XX. Isso é parte de um problema de projeto no qual as variáveis de projeto incluem comprimentos de solda e tamanho de perna de filete.

| **Figura 9-19**



### Solução

A coordenada  $y$  do centroide da seção de fixação é

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i A_i}{\sum A_i} = \frac{25(20)50 + 75(10)50}{10(50) + 20(50)} = 41,7 \text{ mm}$$

Somando momentos ao redor do ponto  $B$  e igualando a zero, temos

$$\sum M_B = 0 = -F_1 b + F \bar{y} = -F_1(0,1) + 107(0,0417)$$

do qual

$$F_1 = 44,6 \text{ kN}$$

Segue que

$$F_2 = 107 - 44,6 = 62,4 \text{ kN}$$

As áreas de garganta de solda têm de estar na razão  $62,4/44,6 = 1,4$  isto é,  $l_2 = 1,4l_1$ . As variáveis de projeto de comprimento de solda estão acopladas por essa relação, assim  $l_1$  é a variável de projeto de comprimento de solda. A outra variável de projeto é o tamanho de perna de solda  $h$ , que foi decidido pelo enunciado do problema. Da Tabela 9-4 a tensão de cisalhamento admissível na garganta  $\tau_{\text{all}}$  é

$$\tau_{\text{all}} = 0,3(483) = 144,9 \text{ MPa}$$

A tensão de cisalhamento  $\tau$  na garganta de  $45^\circ$  é

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{F}{(0,707)h(l_1 + l_2)} = \frac{F}{(0,707)h(l_1 + 1,4l_1)} \\ &= \frac{F}{(0,707)h(2,4l_1)} = \tau_{\text{all}} = 144,9 \text{ MPa} \end{aligned}$$

da qual o comprimento de solda  $l_1$  é

$$l_1 = \frac{107\,000}{144,9 \times 10^6 (0,707) 0,008 (2,4)} = 54,3 \text{ mm}$$

e

$$l_2 = 1,4l_1 = 1,4(54,3) = 76 \text{ mm}$$

Esses são os comprimentos dos cordões de solda requeridos pela resistência do metal de solda. A tensão de cisalhamento permissível da fixação no metal de base, pela Tabela 9-4, é

$$\tau_{\text{all}} = 0,4S_y = 0,4(248) = 99,2 \text{ MPa}$$

A tensão de cisalhamento  $\tau$  no metal de base adjacente à solda é

$$\tau = \frac{F}{h(l_1 + l_2)} = \frac{F}{h(l_1 + 1,4l_1)} = \frac{F}{h(2,4l_1)} = \tau_{\text{all}} = 99,2 \text{ MPa}$$

do qual

$$l_1 = \frac{F}{14,4h(2,4)} = \frac{107\,000}{99,2 \times 10^6(0,008)} = 56,2 \text{ mm}$$

$$l_2 = 1,4l_1 = 1,4(56,2) = 78,7 \text{ mm}$$

Esses são os comprimentos de cordões de solda requeridos pela resistência do metal de base (fixação). O metal de base controla os comprimentos de solda. Para a tensão de tração admissível  $\sigma_{\text{all}}$  na perna da fixação, o valor permissível da AISC para membros de tração é  $0,6S_y$ , logo,

$$\sigma_{\text{all}} = 0,6S_y = 0,6(248) = 148,8 \text{ MPa}$$

A tensão nominal de tração  $\sigma$  é *uniforme* ao longo da seção transversal da fixação por causa da aplicação da carga no centroide. A tensão  $\sigma$  é

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{107\,000}{(0,02)(0,05) + 0,05(0,01)} = 71,3 \text{ MPa}$$

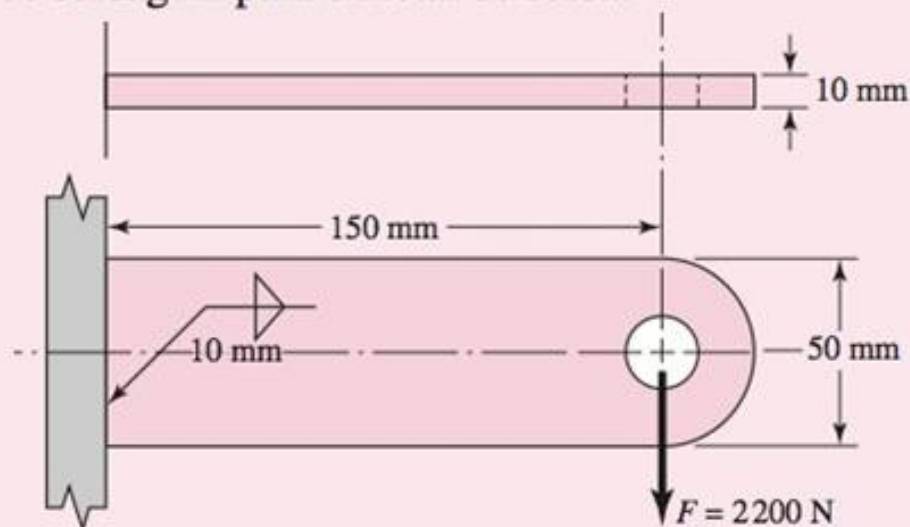
Sendo  $\sigma_{\text{all}} \geq \sigma$ , a seção de perna é satisfatória. Com  $l_1$  fixado a um valor nominal de 58 mm,  $l_2$  deve ser  $1,4(58) = 81,2$  mm

## EXEMPLO 9-4

Realize uma avaliação de adequação da viga em balanço soldada e carregada estaticamente carregando 2,2 kN, representada na Figura 9-20. A viga em balanço é feita de aço AISI 1018 laminado a quente (HR) e soldada com uma solda de filete de 10 mm como mostrado na figura. Um eletrodo E6010 foi usado, e o fator de projeto foi 3,0.

- Use o método convencional para o metal de solda.
- Use o método convencional para o metal de fixação (viga em balanço).
- Use um código de soldagem para o metal de solda.

**Figura 9-20**



### Solução

(a) Da Tabela 9-3,  $S_y = 345 \text{ MPa}$ ,  $S_{ut} = 427 \text{ MPa}$ . Da Tabela 9-2, segunda configuração,  $b = 10 \text{ mm}$ ,  $d = 50 \text{ mm}$ ; assim

$$A = 1,414hd = 1,414(10)50 = 707 \text{ mm}^2$$

$$I_u = d^3/6 = 50^3/6 = 20\,833 \text{ mm}^3$$

$$I = 0,707hI_u = 0,707(10)20\,833 = 147\,289 \text{ mm}^4$$

Cisalhamento primário:

$$\tau' = \frac{F}{A} = \frac{2200}{707} = 3,1 \text{ MPa}$$

Cisalhamento secundário:

$$\tau'' = \frac{Mr}{I} = \frac{2200(150)25}{147\,289} = 56 \text{ MPa}$$

A magnitude do cisalhamento  $\tau$  é a combinação de Pitágoras

$$\tau = (\tau'^2 + \tau''^2)^{1/2} = (3,1^2 + 56^2)^{1/2} = 56,1 \text{ MPa}$$

O fator de segurança baseado em uma resistência mínima e o critério da energia de distorção é

**Resposta**

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau} = \frac{0,577(345)}{56,1} = 3,55$$

Visto que  $n \geq n_d$ , isto é, **3,55**  $\geq 3,0$ , a junção de solda tem resistência satisfatória.

(b) Da Tabela A-18, as resistências mínimas são  $S_{ut} = 400$  MPa e  $S_y = 220$  MPa. Então,

$$\sigma = \frac{M}{I/c} = \frac{M}{bd^2/6} = \frac{2200(150)}{10(50^2)/6} = 79,2 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{220}{79,2} = 2,78$$

Resposta

Uma vez que  $n \geq n_d$ , isto é,  $2,78 < 3$ , a junta é insatisfatória com relação à resistência da fixação.

(c) Com base na parte (a),  $\tau = 56,1$  MPa. Para um eletrodo E6010, a Tabela 9-6 dá a tensão de cisalhamento admissível  $\tau_{all}$  como 124 MPa. Sendo  $\tau < \tau_{all}$ , a solda é satisfatória. Visto que o código já tem um fator de projeto de  $0,577(345)/124 = 1,6$  incluído na igualdade, o fator de segurança correspondente à parte (a) é

$$n = 1,6 \frac{124}{56,1} = 3,54$$

Resposta

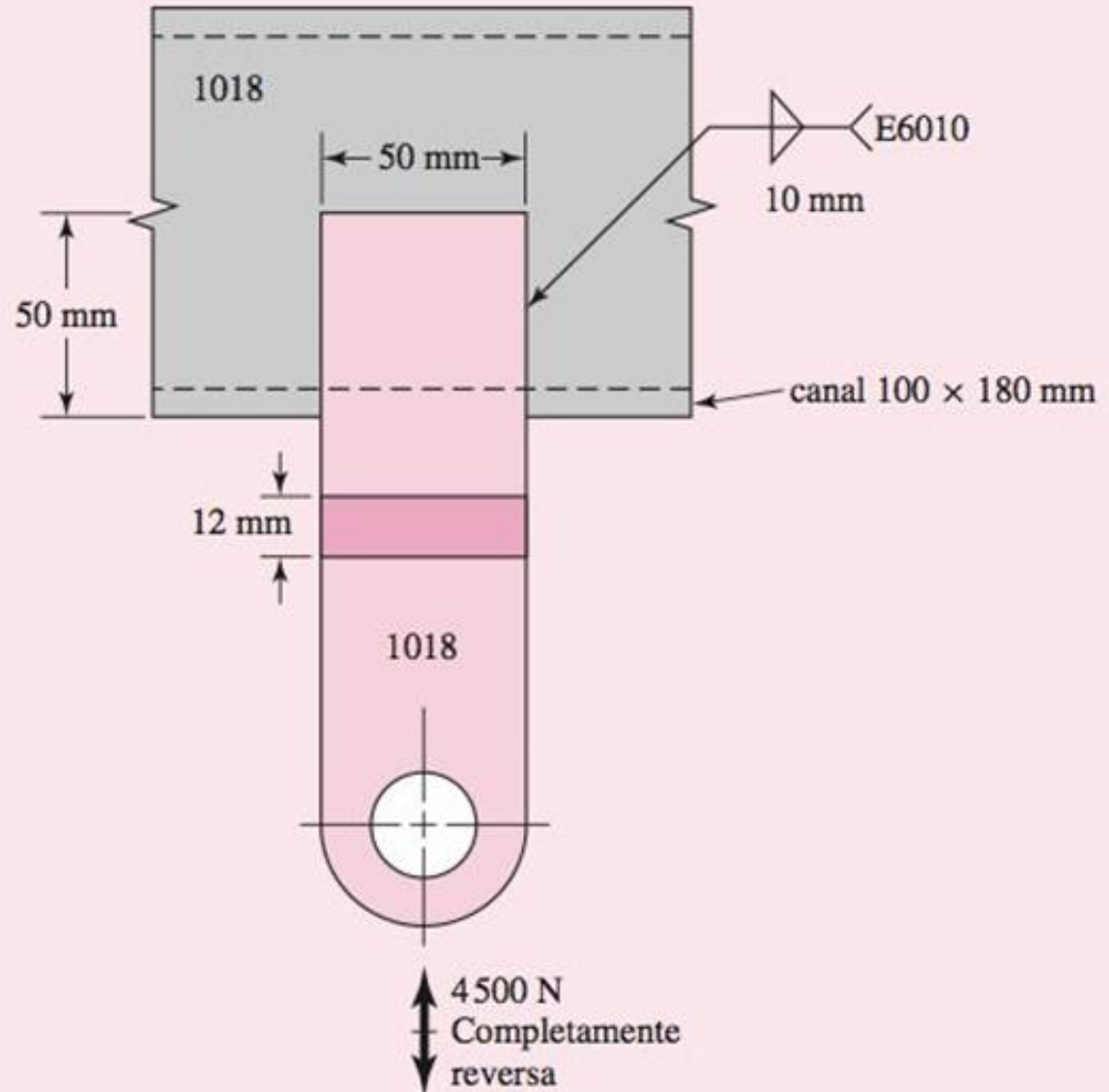
que é consistente.



### EXEMPLO 9-5

A tira de aço 1018 da Figura 9-21 tem uma carga completamente reversa de 4 500-N aplicada. Determine o fator de segurança da soldagem para vida infinita.

#### | Figura 9-21



## 6-7 O limite de resistência à fadiga

Para aços, simplificando nossa observação da Figura 6-17, calculamos o limite de resistência à fadiga em

$$S'_e = \begin{cases} 0,5S_{ut} & S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6-8)$$

em que  $S_{ut}$  é a resistência de tração *mínima*. O símbolo de apóstrofo em  $S'_e$  nessa equação refere-se ao *corpo de prova de viga rotativa*. Desejamos reservar o símbolo  $S_e$ , sem o apóstrofo, para o limite de resistência à fadiga de qualquer elemento particular de máquina submetido a qualquer tipo de carregamento.

## 6-9 Fatores modificadores do limite de resistência à fadiga

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (6-18)$$

em que  $k_a$  = fator de modificação de condição de superfície

$k_b$  = fator de modificação de tamanho

$k_c$  = fator de modificação de carga

$k_d$  = fator de modificação de temperatura

$k_e$  = fator de confiabilidade<sup>14</sup>

$k_f$  = fator de modificação por efeitos variados

$S'_e$  = limite de resistência à fadiga de corpo de prova de teste da viga rotativa

$S_e$  = limite de resistência à fadiga no local crítico de uma peça de máquina na geometria e condição de uso

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (6-19)$$

em que  $S_{ut}$  é a resistência de tração mínima e  $a$  e  $b$  são encontrados na Tabela 6-2.

### Tabela 6-2

Parâmetros para o fator de modificação de superfície de Marin, Equação (6-19).

Acabamento superficial	Fator $a$ $S_{ut}$ MPa	Expoente $b$
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Extraído de C. J. Noll e C. Lipson, "Allowable Working Stresses", *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3, n. 2, 1946, p. 29. Reproduzido por O. J. Horger (ed.) in *Metals Engineering Design ASME Handbook*, Nova York: McGraw-Hill. Copyright © 1953 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reimpresso com autorização.

## Fator de tamanho $k_b$

O fator de tamanho foi avaliado usando 133 conjuntos de pontos de dados.<sup>16</sup> Os resultados para flexão e torção podem ser expressos como

$$k_b = \begin{cases} (d/7,62)^{-0,107} = 1,24d^{-0,107} & 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1,51d^{-0,157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (6-20)$$

Para carregamento axial não há efeito de tamanho, assim

$$k_b = 1 \quad (6-21)$$

### Fator de carregamento $k_c$

Quando ensaios de fadiga são realizados com flexão rotativa, carregamento axial (puxar-empurrar) e carregamento torcional, os limites de resistência à fadiga diferem com relação a  $S_{ut}$ . Isso será discutido na Seção 6-17. Aqui, especificaremos valores médios do fator de carregamento na forma

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexão} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torção}^{18} \end{cases} \quad (6-26)$$

## Solução

Da Tabela A-18 para o metal de fixação 1018, as resistências são  $S_{ut} = 400$  MPa e  $S_y = 220$  MPa. Para o eletrodo E6010,  $S_{ut} = 430$  MPa e  $S_y = 340$  MPa. O fator de concentração de tensão de fadiga, da Tabela 9-5, é  $K_{fs} = 2,7$ . Da Tabela 6-2,  $k_a = 272(400)^{-0,995} = 0,70$ . A área de cisalhamento é

$$A = 2(0,707)10(50) = 707 \text{ mm}^2$$

Para uma tensão de cisalhamento uniforme na garganta,  $k_b = 1$ .

Com base na Equação (6-26), para torção (cisalhamento),

$$k_c = 0,59 \quad k_d = k_e = k_f = 1$$

Das Equações (6-8) e (6-18),

$$S_{se} = 0,70(1)0,59(1)(1)(1)0,5(400) = 82,8 \text{ MPa}$$

$$K_{fs} = 2,7 \quad F_a = 4500 \text{ N} \quad F_m = 0$$

Somente cisalhamento primário está presente:

$$\tau'_a = \frac{K_{fs} F_a}{A} = \frac{2,7(4500)}{707} = 17,2 \text{ MPa} \quad \tau'_m = 0 \text{ MPa}$$

Na ausência de uma componente média, o fator de segurança de fadiga  $n_f$  é dado por

Resposta

$$n_f = \frac{S_{se}}{\tau'_a} = \frac{82,8}{17,2} = 4,81$$

### Tabela A-18

Resistências determinísticas da ASTM mínimas de tração e de escoamento para aços laminados a quente (HR) e estirados a frio (CD).

[As resistências listadas são valores mínimos estimados da ASTM no intervalo de medida de 18 a 32 mm ( $\frac{3}{4}$  a  $1\frac{1}{4}$  in). Estas resistências são apropriadas para uso com o fator de projeto definido na Seção 1-10, provido que os materiais conformem aos requisitos da ASTM A6 ou A568 ou são requeridos em especificações de compra. Lembre que um sistema de numeração não é uma especificação.] Fonte: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS nº	Nº SAE e/ou AISI	Processamento	Resistência à tração MPa (Kpsi)	Resistência ao escoamento MPa (Kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Redução em área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27,5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37,5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39,5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49,5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61,5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248



## 9-5 A resistência de junções soldadas

### Tabela 9-3

Propriedades mínimas metal-solda.

Número de eletrodo AWS*	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)	Elongação porcentual
E60xx	427	345	17-25
E70xx	482	393	22
E80xx	551	462	19
E90xx	620	531	14-17
E100xx	689	600	13-16
E120xx	827	737	14

\* Sistema de numeração de especificação do código da American Welding Society (AWS). Esse sistema utiliza um E prefixado a um sistema de numeração de 4 a 5 dígitos nos quais os dois ou três primeiros dígitos designam a resistência à tração aproximada. O último dígito inclui variáveis na técnica de soldagem, tal como o suprimento de corrente. Os dígitos próximos ao último indicam a posição de soldagem, como, por exemplo, plana, vertical ou suspensa (sobre a cabeça). O conjunto completo de especificações pode ser obtido da AWS por meio de requisição.

## 9-5 A resistência de junções soldadas

### Tabela 9-5

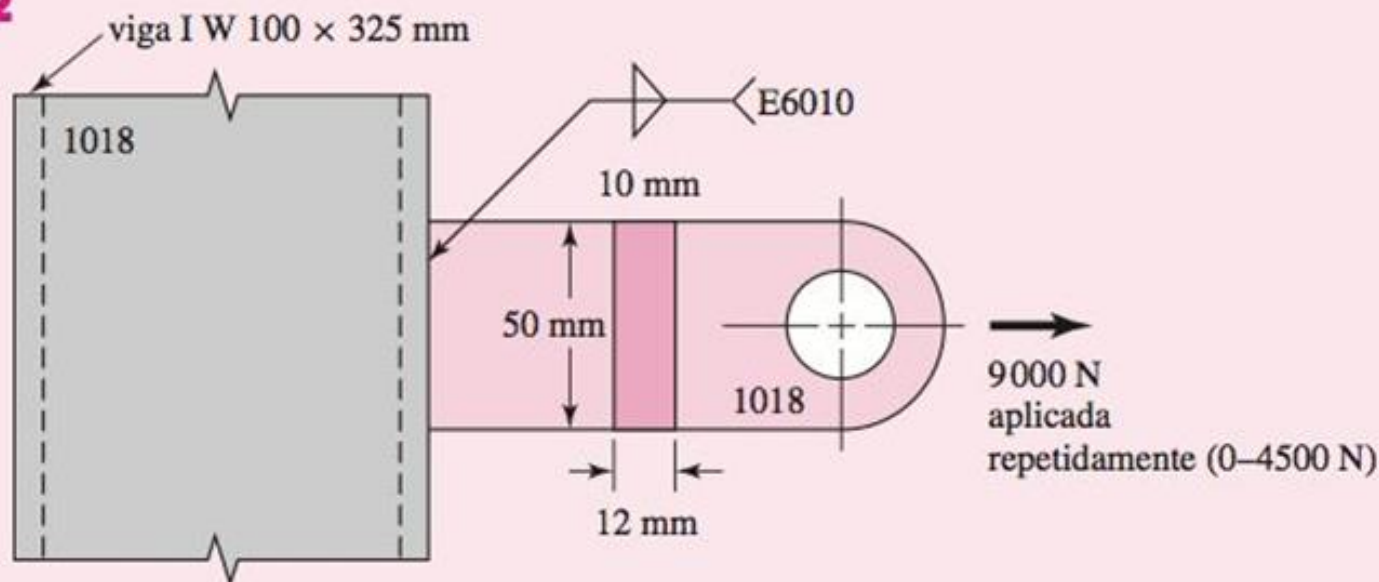
Fatores de concentração de tensão de fadiga,  $K_{fs}$ .

Tipo de solda	$K_{fs}$
Solda de topo reforçada	1,2
Ponta de solda de filete transversal	1,5
Extremidade de solda paralela	2,7
Junção em topo-T com cantos aguçados	2,0

## EXEMPLO 9-6

A tira de aço 1018 da Figura 9-22 tem uma carga aplicada repetidamente de 9000 N ( $F_e = F_m = 4500$  N). Determine o fator de segurança de falha por fadiga de soldagem.

### | Figura 9-22



### Solução

Da Tabela 6-2,  $k_a = 272(400)^{-0,995} = 0,7$ .

$$A = 2(0,707)10(50) = 707 \text{ mm}^2$$

Para tensão de cisalhamento uniforme na garganta,  $k_b = 1$ .

Da Equação (6-26),  $k_c = 0,59$ . Das Equações (6-8) e (6-18),

$$S_{se} = 0,7(1)0,59(1)(1)(1)0,5(400) = 82,8 \text{ MPa}$$

Da Tabela 9-5,  $K_{fs} = 2$ . Somente cisalhamento primário está presente:

$$\tau'_a = \tau'_m = \frac{K_{fs} F_a}{A} = \frac{2(4500)}{707} = 12,7 \text{ MPa}$$

## 6-13 Resistência à fadiga torcional sob tensões flutuantes

$$S_{su} = 0,67 S_{ut} \quad (6-53)$$

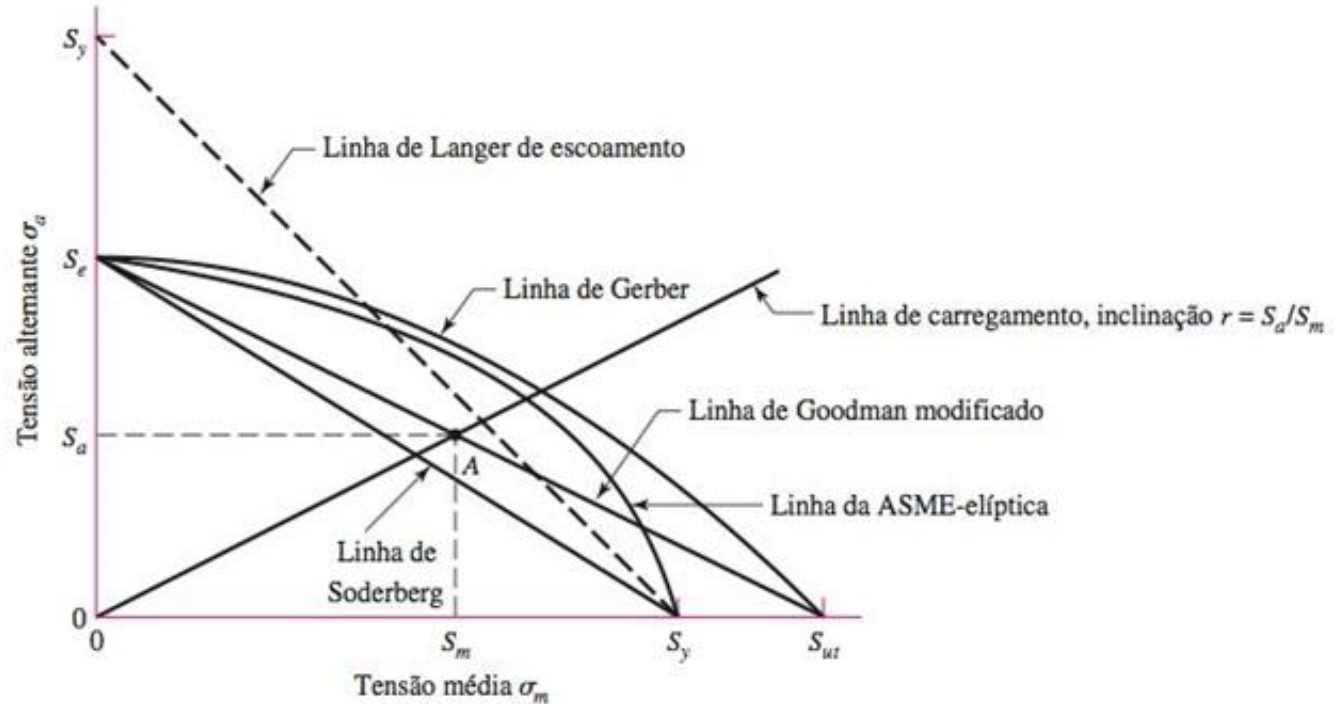
Com base na Equação (6-53),  $S_{su} \doteq 0,67S_{ut}$ . Isso, juntamente com o critério de falha por fadiga de Gerber para tensões de cisalhamento da Tabela 6-7, resulta em

$$n_f = \frac{1}{2} \left( \frac{0,67S_{ut}}{\tau_m} \right)^2 \frac{\tau_a}{S_{se}} \left[ -1 + \sqrt{1 + \left( \frac{2\tau_m S_{se}}{0,67S_{ut} \tau_a} \right)^2} \right]$$

**Resposta**  $n_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{0,67(400)}{12,7} \right]^2 \frac{12,7}{82,8} \left\{ -1 + \sqrt{1 + \left[ \frac{2(12,7)82,8}{0,67(400)12,7} \right]^2} \right\} = 5,99$

## Figura 6-27

Diagrama de fadiga que mostra vários critérios de falha. Para cada critério, pontos na respectiva linha ou "acima" indicam falha. Um ponto *A* na linha de Goodman, por exemplo, dá a resistência  $S_m$  como o valor limite de  $\sigma_m$  correspondente à resistência  $S_a$ , que, emparelhada com  $\sigma_m$ , é o valor limite de  $\sigma_a$ .



## Tabela 6-6

Amplitude e coordenadas estáveis de resistência e intersecções importantes no primeiro quadrante para os critérios de falha de Goodman modificado e Langer.

### Equações de intersecção

### Coordenadas da intersecção

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

$$S_a = \frac{r S_e S_{ut}}{r S_{ut} + S_e}$$

Linha de carregamento  $r = \frac{S_a}{S_m}$

$$S_m = \frac{S_a}{r}$$

$$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$$

$$S_a = \frac{r S_y}{1 + r}$$

Linha de carregamento  $r = \frac{S_a}{S_m}$

$$S_m = \frac{S_y}{1 + r}$$

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = 1$$

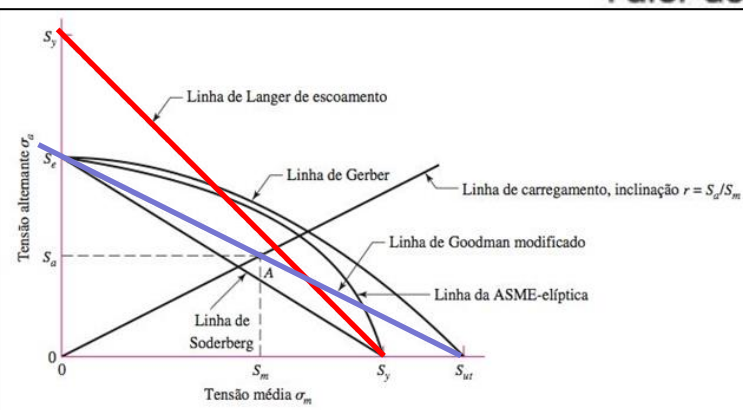
$$S_m = \frac{(S_y - S_e) S_{ut}}{S_{ut} - S_e}$$

$$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$$

$$S_a = S_y - S_m, r_{crit} = S_a/S_m$$

### Fator de segurança de fadiga

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}}$$



## Tabela 6-7

Amplitude e coordenadas estáveis de resistência e intersecções importantes no primeiro quadrante para os critérios de falha de Gerber e de Langer.

### Equações de intersecção

### Coordenadas da intersecção

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$$

$$S_a = \frac{r^2 S_{ut}^2}{2 S_e} \left[ -1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 S_e}{r S_{ut}}\right)^2} \right]$$

Linha de carregamento  $r = \frac{S_a}{S_m}$

$$S_m = \frac{S_a}{r}$$

$$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$$

$$S_a = \frac{r S_y}{1 + r}$$

Linha de carregamento  $r = \frac{S_a}{S_m}$

$$S_m = \frac{S_y}{1 + r}$$

$$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$$

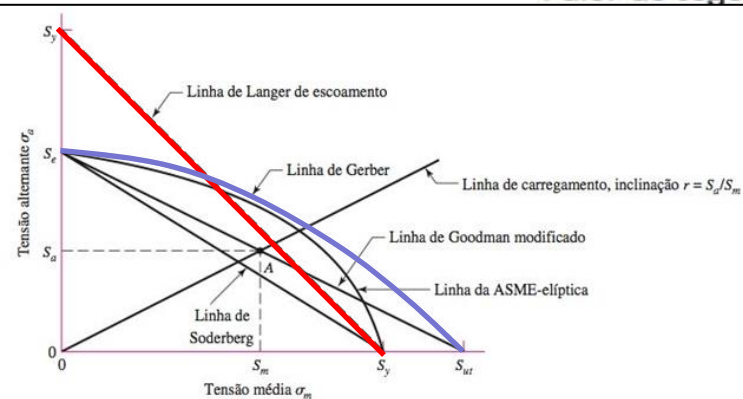
$$S_m = \frac{S_{ut}^2}{2 S_e} \left[ 1 - \sqrt{1 + \left(\frac{2 S_e}{S_{ut}}\right)^2 \left(1 - \frac{S_y}{S_e}\right)} \right]$$

$$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$$

$$S_a = S_y - S_m, r_{crit} = S_a/S_m$$

### Fator de segurança de fadiga

$$n_f = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m}\right)^2 \frac{\sigma_a}{S_e} \left[ -1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 \sigma_m S_e}{S_{ut} \sigma_a}\right)^2} \right] \quad \sigma_m > 0$$



## Tabela 6-8

Amplitude e coordenadas estáveis de resistência e intersecções importantes no primeiro quadrante para os critérios de falha ASME-elíptico e de Langer.

### Equações de intersecção

### Coordenadas da intersecção

$$\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 = 1$$

Linha de carregamento

$$r = S_a/S_m$$

$$S_a = \sqrt{\frac{r^2 S_e^2 S_y^2}{S_e^2 + r^2 S_y^2}}$$

$$S_m = \frac{S_a}{r}$$

$$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$$

Linha de carregamento

$$r = S_a/S_m$$

$$S_a = \frac{r S_y}{1 + r}$$

$$S_m = \frac{S_y}{1 + r}$$

$$\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_y}\right)^2 = 1$$

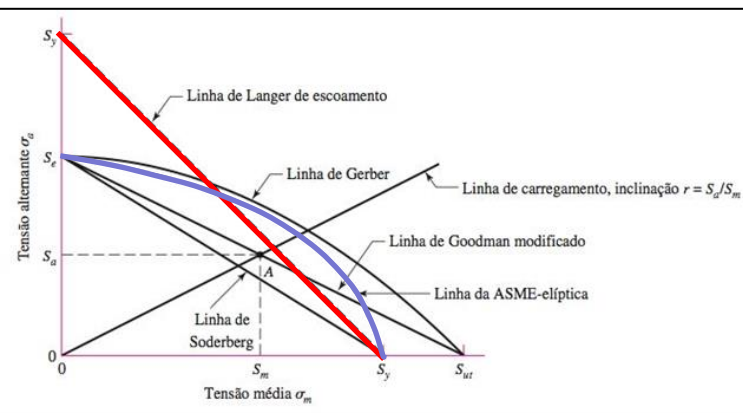
$$\frac{S_a}{S_y} + \frac{S_m}{S_y} = 1$$

$$S_a = 0, \frac{2 S_y S_e^2}{S_e^2 + S_y^2}$$

$$S_m = S_y - S_a, r_{crit} = S_a/S_m$$

Fator de segurança de fadiga

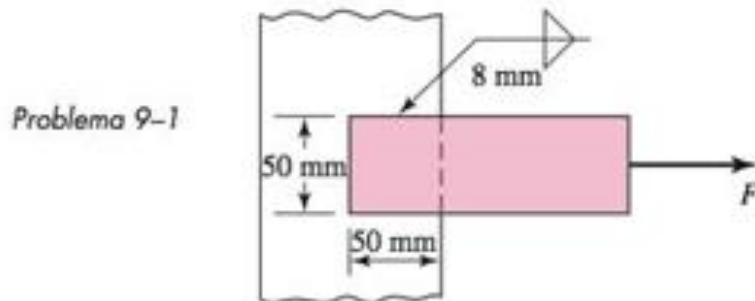
$$n_f = \sqrt{\frac{1}{(\sigma_a/S_e)^2 + (\sigma_m/S_y)^2}}$$



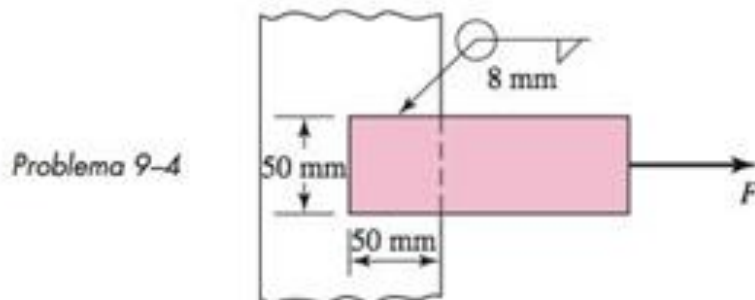


## PROBLEMAS

- 9-1** A figura mostra uma barra de aço horizontal de 10 mm de espessura carregada em tração estável e soldada a um suporte vertical. Encontre a carga  $F$  que causará uma tensão de cisalhamento de 140 MPa nas gargantas das soldas.



- 9-2** Para a soldagem do Problema 9-1, o eletrodo especificado é E7010. Para o metal do eletrodo, qual é a carga admissível na soldagem?
- 9-3** Os elementos, sendo unidos no Problema 9-1, são de aço 1018 laminado a frio para a barra e 1018 laminado a quente para o suporte vertical. Que carga é admissível na soldagem para que o metal do elemento seja incorporado nas soldas?
- 9-4** Uma barra de aço de 8 mm é soldada a um suporte vertical como mostra a figura. Qual é a tensão de cisalhamento na garganta das soldas se a força  $F$  for 140 kN?

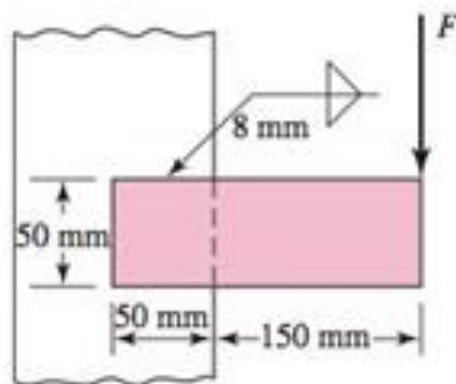


**9-5**

Uma barra de aço de 20 mm de espessura, a ser usada como uma viga, é soldada a um suporte vertical por duas soldas de filete como ilustrado.

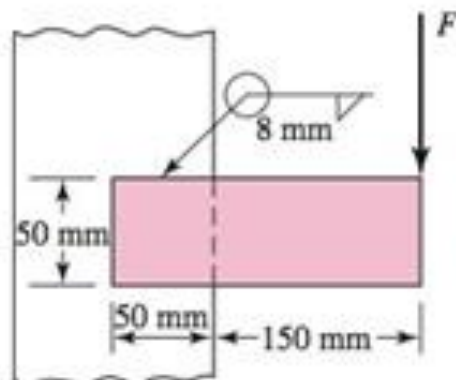
- (a) Encontre a força de flexão  $F$  segura caso a tensão permissível de cisalhamento nas soldas seja de 140 MPa.  
 (b) Na parte (a) você encontrou uma expressão simples para  $F$  em termos da tensão de cisalhamento admissível. Encontre a carga admissível caso o eletrodo seja E7010, a barra seja de aço 1020 laminado a quente e o suporte seja de aço 1015 laminado a quente.

Problema 9-5

**9-6**

A figura mostra uma soldagem exatamente como aquela do Problema 9-5, exceto que existem quatro soldas em vez de duas. Mostre que a soldagem é duas vezes mais forte que a do Problema 9-5.

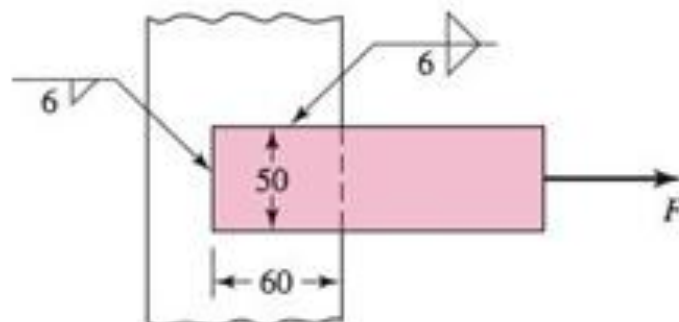
Problema 9-6



**9-7**

A soldagem mostrada na figura está sujeita a uma força alternante  $F$ . A barra de aço laminado a quente tem 10 mm de espessura e é de aço AISI 1010. O suporte vertical é igualmente de aço 1010. O eletrodo é de aço 6010. Calcule a carga de fadiga  $F$  que a barra carregará caso três soldas de filete de 6 mm sejam usadas. Use uma análise convencional de fadiga.

Problema 9-7



Dimensões em milímetros

**9-8**

A tensão permissível de cisalhamento para a soldagem ilustrada é de 140 MPa. Calcule a carga,  $F$ , que causará esta tensão na garganta de soldagem.

Problema 9-8



Dimensões em milímetros

**9-9**

No projeto de soldagem em torção é útil ter uma percepção hierárquica da eficiência relativa dos padrões comuns. Por exemplo, os padrões de cordão de solda mostrados na Tabela 9-1 podem ser classificados por desejabilidade. Suponha que o espaço disponível seja um quadrado  $a \times a$ . Use uma figura formal de mérito que seja diretamente proporcional a  $J$  e inversamente proporcional ao volume de metal soldado depositado:

$$\text{fom} = \frac{J}{\text{vol}} = \frac{0,707hJ_u}{(h^2/2)l} = 1,414 \frac{J_u}{hl}$$

Uma figura tática de mérito poderia omitir a constante, que é  $\text{fom}' = J_u/(hl)$ . Ordene os seis padrões da Tabela 9-1 do mais ao menos eficiente.

**9-10**

O espaço disponível para um padrão de cordão de solda sujeito a flexão é  $a \times a$ . Posicione os padrões da Tabela 9-2 em ordem hierárquica de eficiência de colocação de metal de solda para resistir à flexão. Uma figura formal de mérito pode ser diretamente proporcional a  $I$  e inversamente proporcional ao volume de metal de solda depositado:

$$\text{fom} = \frac{I}{\text{vol}} = \frac{0,707hI_u}{(h^2/2)l} = 1,414 \frac{I_u}{hl}$$

A figura tática de mérito pode omitir a constante 1,414, que é  $\text{fom}' = I_u/(hl)$ . Omita os padrões designados para vigas T e vigas I. Ordene os sete padrões remanescentes.

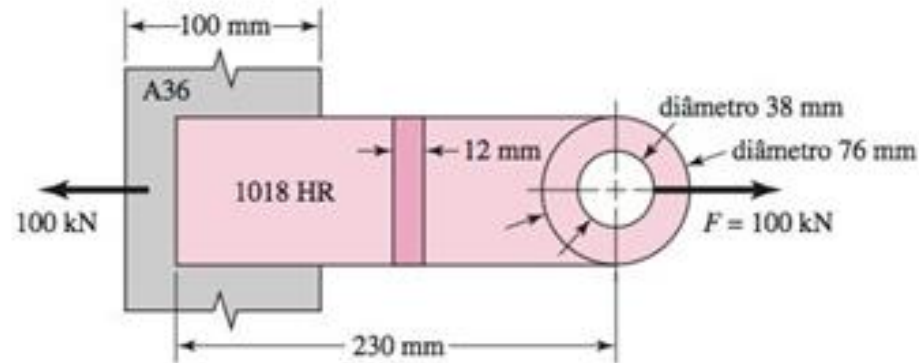
**9-11**

Entre as formas possíveis de problemas de soldagem estão as seguintes:

- A conexão e elemento(s) existem e somente as especificações de solda necessitam ser decididas.
- Os elementos existem, mas ambas, a conexão e a soldagem, devem ser projetadas.
- A conexão, membro(s) e soldagem devem ser projetados.

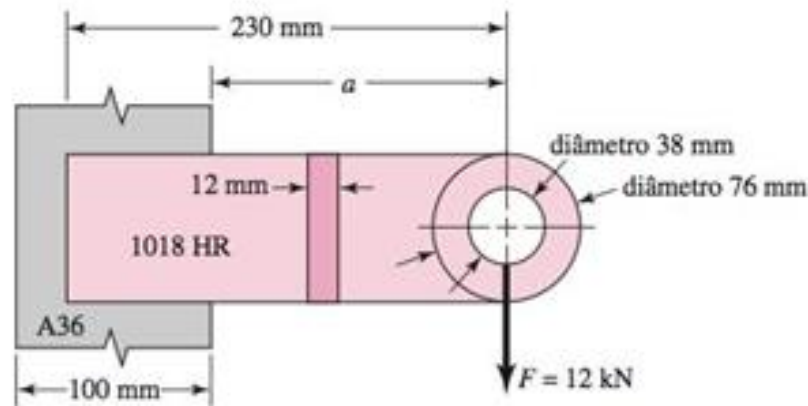
O que segue é uma tarefa de projeto de primeira categoria. A conexão mostrada na figura é feita de aço 1018 laminado a quente (HR) de 12 mm de espessura. A força estática é de 100 kN. O elemento tem 100 mm de largura, tal como aquele mostrado no Problema 9-4. Especifique a soldagem (dê o padrão, o número do eletrodo, o tipo de solda, o comprimento de solda e o tamanho de perna).

Problema 9-11

**9-12**

A conexão mostrada carrega uma carga de flexão de 12 kN. O espaço livre  $a$  deve ser de 150 mm. A carga é estática de 12 kN. Especifique a soldagem (dê o padrão, o número de eletrodo, o tipo de solda, o comprimento de solda e o tamanho de perna).

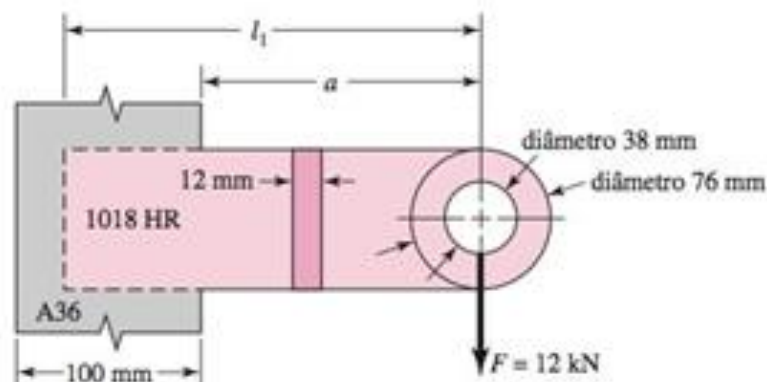
Problema 9-12



**9-13**

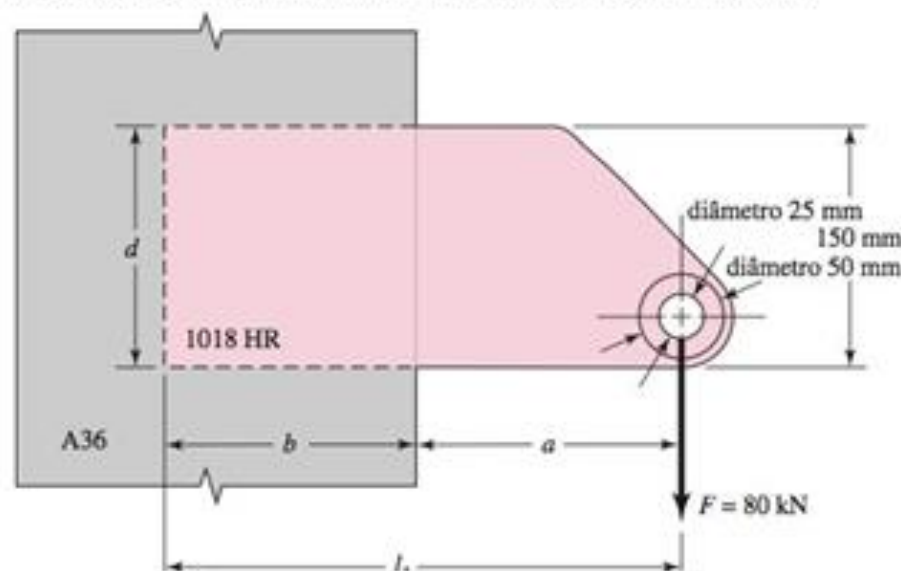
A conexão no Problema 9-12 não teve seu comprimento determinado. A força estática é de 12 kN; o espaço livre  $a$  deve ser de 150 mm. O elemento tem 100 mm. Especifique a soldagem (dê o padrão, o número de eletrodo, o tipo de solda, o comprimento de conta e o tamanho de perna). Especifique o comprimento da conexão.

Problema 9-13

**9-14**

Uma coluna vertical de aço estrutural A36 ( $S_y = 250$  MPa,  $S_{ur} = 400 - 550$  MPa) tem 250 mm de largura. Uma conexão foi projetada para o ponto mostrado na figura. A carga estática de 80 kN é aplicada, e o espaço livre  $a$  de 156 mm tem de ser igualado ou excedido. A conexão é de aço 1018 laminado a quente, a ser feita de placa de 12 mm com protuberâncias soldadas quando todas as dimensões forem conhecidas. Especifique a soldagem (dê o padrão, o número de eletrodo, o tipo de solda, o comprimento de cordão de solda e o tamanho de perna). Especifique também o comprimento  $l_1$  para a conexão.

Problema 9-14



**9-15** Escreva um programa de computador para ajudá-lo com uma tarefa semelhante à do Problema 9-14 com um padrão retangular de cordão de solda para uma junção torcional de cisalhamento. Ao fazê-lo, solicite a força  $F$ , o espaço livre  $a$  e a maior tensão admissível de cisalhamento. Então, como parte de um ciclo iterativo, solicite as dimensões  $b$  e  $d$  do retângulo. Essas podem ser suas variáveis de desenho. Apresente todos os parâmetros após o tamanho de perna ter sido determinado por cômputo. Com efeito, essa será sua avaliação de adequação quando você parar a iteração. Inclua a figura de mérito  $J_u / (hl)$  na saída. A fom e o tamanho de perna  $h$  com a largura disponível dará a você uma introspecção útil na natureza dessa classe de soldas. Use o programa para verificar suas soluções ao Problema 9-14.

**9-16** Soldas de filete na junção que resistem a uma flexão são interessantes uma vez que elas podem ser mais simples que aquelas que resistem à torção. Do Problema 9-10 você aprendeu que seu objetivo é colocar metal de solda tão longe do centroide do cordão de solda quanto possível, mas distribuído em uma orientação paralela ao eixo  $x$ . Além disso, a colocação no topo e no fundo da extremidade incrustada de uma viga de balanço com seção transversal retangular resulta em cordões de solda paralelos, cada um dos quais está em uma posição ideal. O objetivo deste problema é estudar o cordão de solda completo e o padrão de cordão de solda interrompido. Considere o caso da Figura 9-17 com  $F = 40$  kN, comprimento da viga  $a = 250$  mm,  $b = 200$  mm e  $d = 200$  mm. Para o segundo caso, para a solda interrompida considere uma brecha central de  $b_1 = 50$  mm existente em soldas de topo e fundo. Estude os dois casos com  $\tau_{\text{all}} = 88$  MPa. O que você nota com relação a  $\tau$ ,  $\sigma$  e  $\tau_{\text{max}}$ ? Compare a fom'.

**9-17**

Para uma trilha retangular de cordão de solda que resiste à flexão, desenvolva equações para tratar casos de soldas verticais, soldas horizontais e padrões de solda ao redor de contornos com profundidade  $d$  e largura  $b$  e permitindo brechas centrais nos cordões paralelos de comprimento  $b_1$  e  $d_1$ . Faça isso por superposição de trilhas paralelas, trilhas verticais subtraindo as brechas. Então ponha as duas juntas para um cordão de solda retangular com brechas centrais de comprimento  $b_1$  e  $d_1$ . Mostre que os resultados são

$$A = 1,414(b - b_1 + d - d_1)h$$

$$I_u = \frac{(b - b_1)d^2}{2} + \frac{d^3 - d_1^3}{6}$$

$$I = 0,707hI_u$$

$$l = 2(b - b_1) + 2(d - d_1)$$

$$\text{fom} = \frac{I_u}{hl}$$

**9-18**

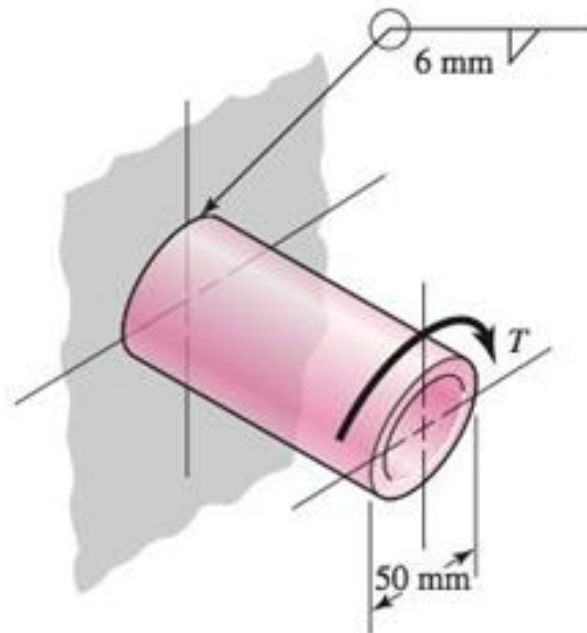
Produza um programa de computador baseado no protocolo do Problema 9-17. Solicite a maior tensão admissível de cisalhamento, a força  $F$  e o espaço livre  $a$ , bem como as dimensões  $b$  e  $d$ . Comece um ciclo iterativo solicitando  $b_1$  e  $d_1$ . Cada ou ambos podem ser suas variáveis de projeto. Programe para encontrar o tamanho de perna que corresponde a um nível de tensão de cisalhamento no nível máximo admissível em um canto. Apresente todos os parâmetros incluindo a figura de mérito. Use o programa para verificar quaisquer problemas anteriores para os quais ele seja aplicável. Treine com o programa em um modo “o que ocorre se...” e aprenda a cerca das tendências de seus parâmetros.



**9-19** Quando comparamos dois padrões de soldagem diferentes é útil observar a resistência à flexão, ou torção, e o volume de metal de solda depositado. A medida de efetividade, definida como o segundo momento de área dividido pelo volume de metal de solda, é útil. Se uma seção de 150 mm por 200 mm de uma viga em balanço carrega uma carga estática de flexão de 40 kN a 250 mm do plano de soldagem, com uma tensão admissível de cisalhamento de 88 MPa medida, compare as soldagens horizontais com as soldagens verticais. Os cordões horizontais devem ter 150 mm de comprimento e os cordões verticais, 200 mm de comprimento.

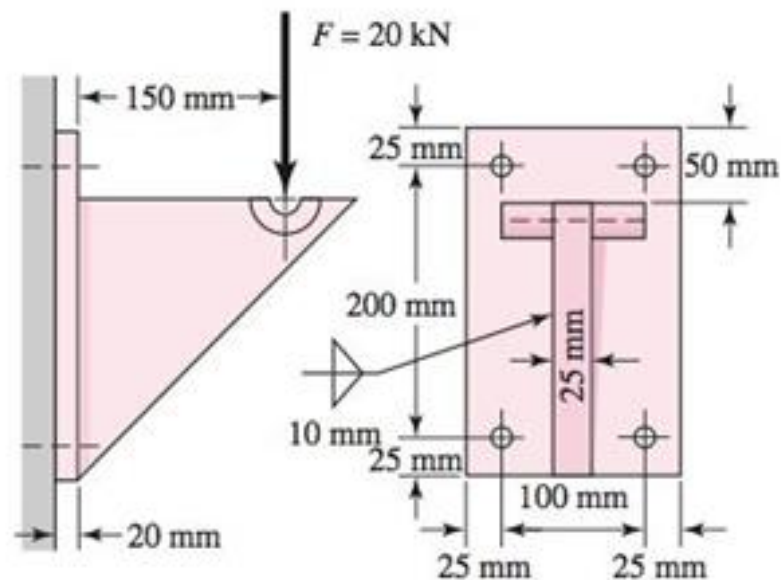
**9-20** Um torque  $T = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}$  é aplicado à soldagem mostrada. Calcule a tensão máxima de cisalhamento na garganta de solda.

Problema 9-20



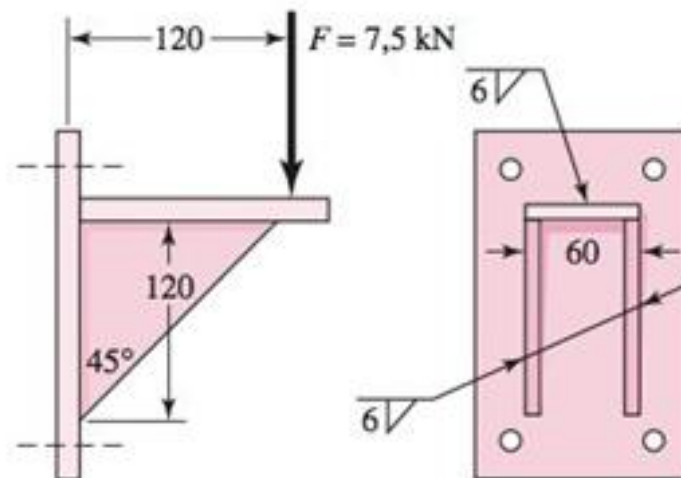
**9-21** Encontre a tensão máxima de cisalhamento na garganta do metal de solda na figura.

Problema 9-21



**9-22** A figura mostra um pedestal de aço soldado carregado por uma força estática  $F$ . Calcule o fator de segurança se a tensão admissível de cisalhamento na garganta de solda é 120 MPa.

Problema 9-22

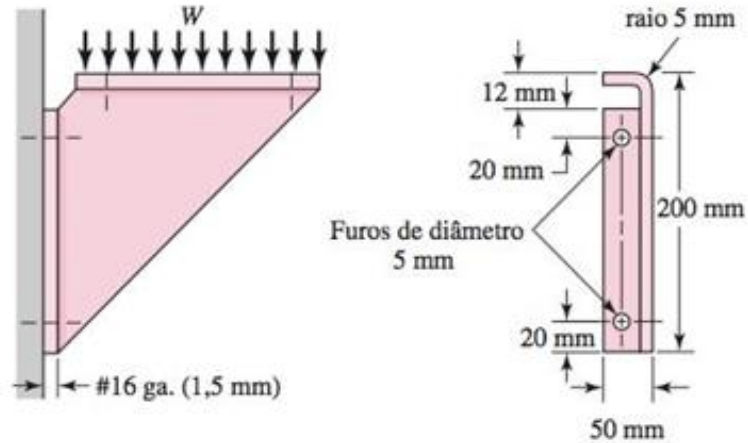


Dimensões em milímetros

**9-23**

A figura mostra uma cantoneira formada de chapa de aço. Em vez de fixá-la ao suporte com parafusos de máquina, foi proposta a soldagem. Se a tensão combinada no metal de solda está limitada a 6 MPa, calcule a carga total  $W$  que a cantoneira aguentará. As dimensões da flange de topo são as mesmas da flange de montagem.

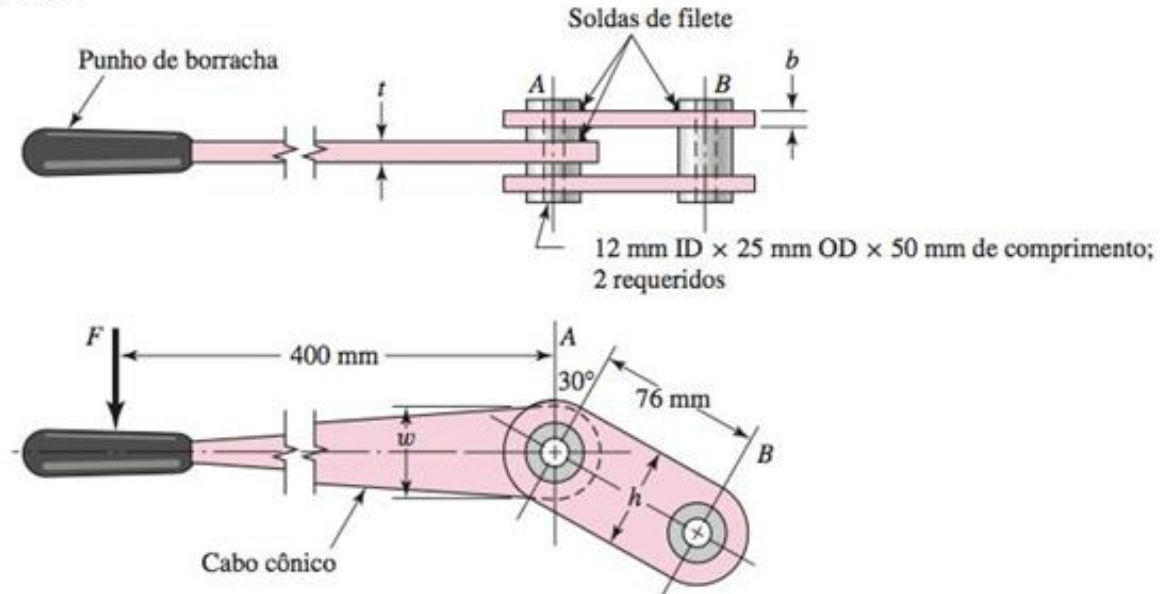
**Problema 9-23**  
 O suporte estrutural é de aço estrutural A26, o suporte é de aço 1020 conformado a frio. O eletrodo de solda é de aço 6010.



**9-24**

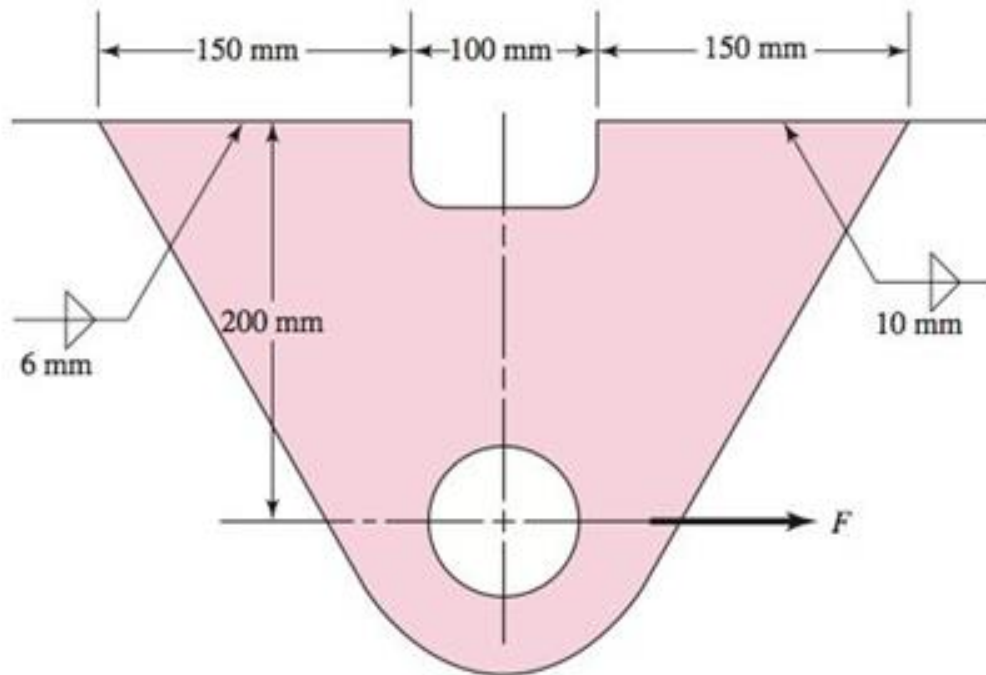
Sem suporte, um maquinista pode exercer somente cerca de 400 N em uma chave de encaixe ou cabo de ferramenta. A alavanca mostrada na figura tem  $t = 12$  mm e  $w = 50$  mm. Desejamos especificar o tamanho do filete de solda para segurar a alavanca à parte tubular em A. Ambas as partes são de aço, e a tensão de cisalhamento na garganta de solda não deve exceder 20 MPa. Encontre o tamanho seguro de solda.

**Problema 9-24**



**9-25**

Calcule a carga segura estática  $F$  para a soldagem mostrada na figura se um eletrodo E6010 for usado e o fator de projeto tiver de ser 2. Use análise convencional.

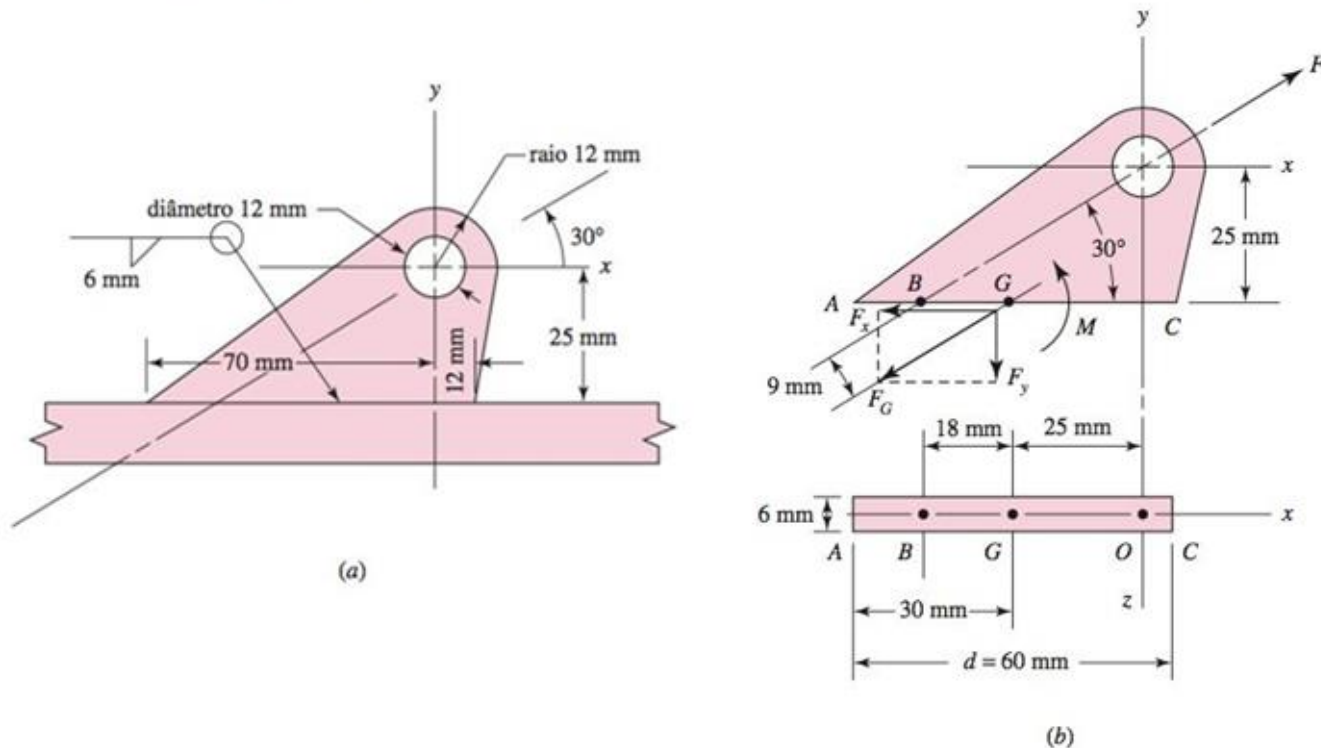


Problema 9-25

9-26

Um suporte, tal qual o mostrado, é usado em atracamento de pequenas embarcações. A falha de tais suportes geralmente é causada por pressão de suporte do prendedor de amarre contra o lado do orifício. Nosso propósito aqui é obter uma ideia das margens estática e dinâmica de segurança envolvidas. Usamos um suporte de 6 mm de espessura feito de aço 1018 laminado a quente. Consideramos então que a ação de onda na embarcação criará a força  $F$  não maior que 5 kN.

- (a) Identifique o momento  $M$  que produz uma tensão de cisalhamento na garganta resistindo à ação de flexão com uma “tração” em  $A$  e “compressão” em  $C$ .
- (b) Encontre a componente de força  $F_y$  que produz uma tensão de cisalhamento na garganta resistindo a uma “tração” por meio da solda.
- (c) Encontra a componente de força  $F_x$  que produz um cisalhamento em linha por toda a solda.
- (d) Encontre  $A$ ,  $I_u$  e  $I$  usando a Tabela 9-2 na peça.
- (e) Encontre a tensão de cisalhamento  $\tau_1$  em  $A$  causada por  $F_y$  e  $M$ , a tensão de cisalhamento  $\tau_2$  causada por  $F_x$  e combine para encontrar  $\tau$ .
- (f) Encontre o fator de segurança resguardando de escoamento de cisalhamento na soldagem.
- (g) Encontre o fator de segurança resguardando de uma falha estática no metal original na solda.
- (h) Encontre o fator de segurança resguardando de uma falha por fadiga no metal de solda usando o critério de falha de Gerber.



## B-9 Capítulo 9

9-1  $F = 79,2 \text{ kN}$

9-3  $F = 49,8 \text{ kN}$

9-5 (a)  $\tau' = 1,768(10^{-3})F \text{ MPa}$ ,  
 $\tau''_x = \tau''_y = 10,608(10^{-3})F \text{ MPa}$ ;  
 $\tau_{\max} = 16,3(10^{-3})F \text{ MPa}$ ,  $F = 8,59 \text{ kN}$ ;

(b)  $\tau_{\text{all}} = 76 \text{ MPa}$ ,  $F_{\text{all}} = 4,66 \text{ kN}$

9-8  $F = 49,7 \text{ kN}$

9-9 Primeiro um cordão de dois caminhos, depois cordões verticais paralelos e cordões quadrados

9-10 Primeiro: cordões horizontais paralelos. Segundo: cordões quadrados

9-11 Decisões: padronizadas; quadrado em todo contorno. Eletrodo: E60XX  
Tipo: dois filetes paralelos, dois filetes transversais.  
Comprimento de cordões: 300 mm  
Perna = 6 mm

9-20  $\tau_{\max} = 120 \text{ MPa}$

9-22  $n = 3,57$