

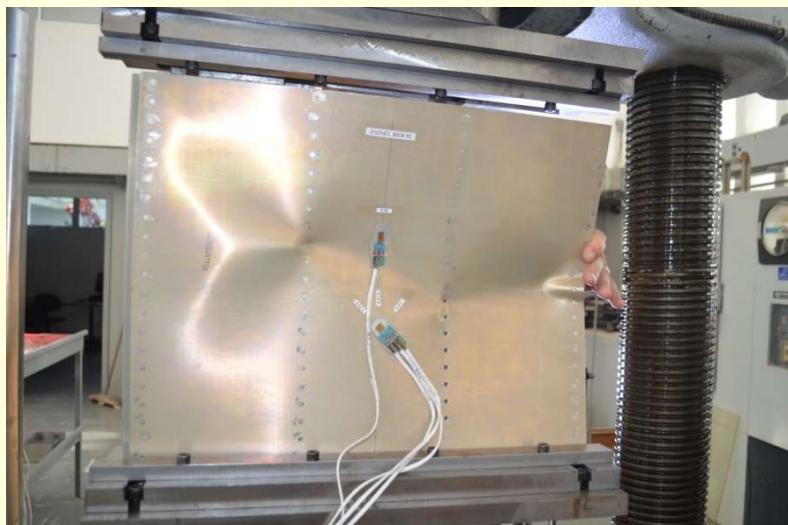
ESTRUTURAS AEROESPACIAIS II

Prof. Mauricio V. Donadon

ITA-IEA



Falha de Painéis Reforçados



Falha Local de Painéis Reforçados – Método Gerard

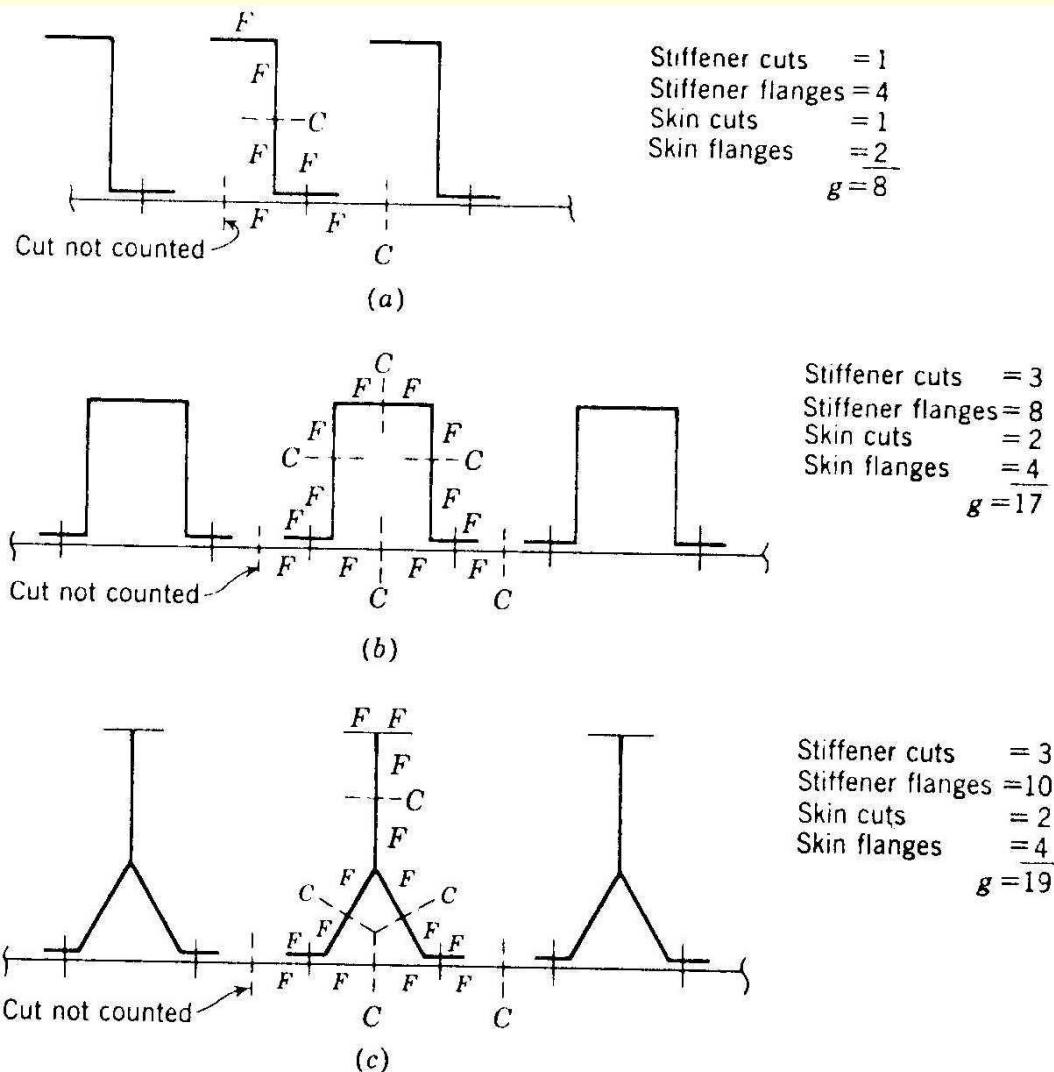


Fig. 6-28 Exemplos de Determinação do Parâmetro g

$$\frac{\bar{F}_{cc}}{\bar{F}_{cy}} = \beta_g \left[\left(\frac{g \bar{t}_w t_s}{A} \right) \sqrt{\frac{E}{\bar{F}_{cy}}} \right]^m$$

$$\bar{F}_{cy} = \frac{F_{cys} + F_{cyw}(\bar{t}/t_s - 1)}{\bar{t}/t_s}$$

$$\bar{t} = \frac{A_{\text{total}}}{b_s} = \frac{A_{st} + b_s t_s}{b_s}$$



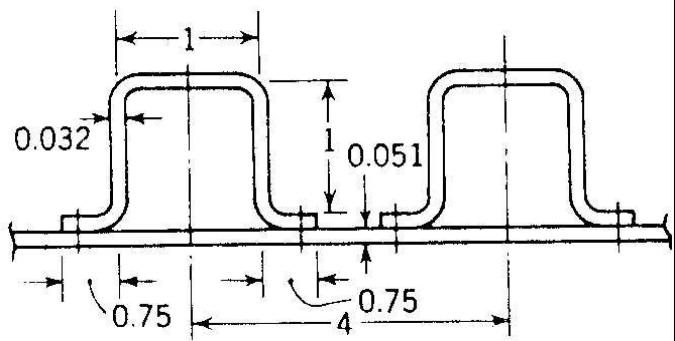
Falha Local de Painéis Reforçados – Método Gerard

Tabela 6.3 Valores dos Parâmetros para Painéis Reforçados

Type of panel	g	m	$\frac{t_w}{t_s}$	β_σ	Cutoff
1. Formed Z stiffeners	8	0.85	—	0.56	σ_{cy}
2. Formed hat stiffeners	17	0.85	1.25	0.59	$0.8\sigma_{cy}$
			1.00	0.56	$0.8\sigma_{sy}$
			0.63	0.50	$0.8\sigma_{ey}$
			0.39	0.48	$0.8\sigma_{ey}$
3. Extruded Y stiffeners	19	0.85	1.16	0.56	
			0.732	0.51	
			0.464	0.48	
4. General angle-type stiffeners	—	0.85	—	0.56	
5. General T-type stiffeners	—	0.40	—	0.67	$0.75\sigma_{cy}$



Exemplo



Os reforçadores conformados tipo-chapéu no painel da figura são manufaturados em liga AL 7075-T6 ($E = 10500\text{ksi}$, $F_{cy} = 67 \text{ ksi}$) e o revestimento é de liga AL 2024-T3 ($F_{cy} = 40 \text{ ksi}$). Determine a tensão de falha local

Solução **área total** $A = 0,051 \times 4 + 0,032 \times (1 + 2 \times 1 + 2 \times 0,75) = 0,348 \text{ in}^2$

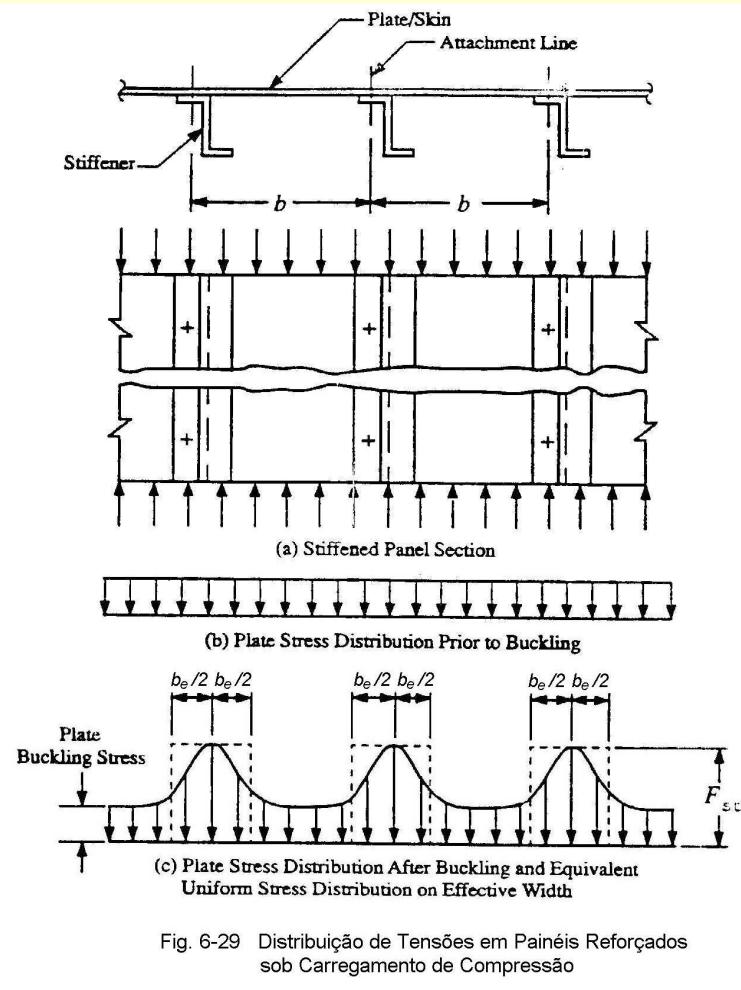
$$\bar{t} = \frac{0,348}{4} = 0,087 \quad \bar{F}_{cy} = \frac{40 + 67[(0,087/0,051) - 1]}{0,087/0,051} = 51,2 \text{ ksi}$$

$$t_w/t_s = 0,032/0,051 = 0,63, \text{ acha-se, da Tab. 6-3, que } g = 17, m = 0,85 \text{ e } \beta_g = 0,50$$

$$\frac{\bar{F}_{cc}}{\bar{F}_{cy}} = 0,50 \left[\frac{17 \times 0,032 \times 0,051}{0,348} \sqrt{\frac{10500}{51,2}} \right]^{0,85} = 0,560 < \frac{F_{cut}}{\bar{F}_{cy}} \Rightarrow \bar{F}_{cc} = 0,560 \times 51,2 = 28,7 \text{ ksi}$$



Falha Local de Painéis – Método Boeing



$$b_e = 1,7t \frac{E_{sk}}{E_{st}} \sqrt{\frac{E_c}{F_{st}}}$$

b_e = largura efetiva de chapa

t = espessura do revestimento

E = módulo de elasticidade do revestimento

E_{sk} = módulo secante do revestimento na deformação (F_{st}/E_{st})

E_{st} = módulo secante do reforçador na tensão F_{st}

F_{st} = tensão de compressão no reforçador

se $b/t \geq 110$, o fator 1,7

pode ser aumentado para 1,9

$$(b_e)_{red} = b_e \frac{F_{ir}}{F_{st}} \frac{E_{st}}{E_{sk}}$$

onde F_{ir} é a tensão de flambagem entre rebites

$$\overline{F}_{cc} = \frac{F_{st}(A_{st} + A_e)}{A_{st} + bt}$$



Larguras Efetivas de Chapa - Boeing

Tabela 6.4 Cálculo da Largura Efetiva para Painéis Conectados Mecanicamente

Attachment	Configuration	Total Effective Skin Area, A_e	Effective Stiffener Flange Thickness ($t_{f,eff}$) at Skin (for calculating F_{cc})
1 Single Row		$b_e t$	t_f
2 Double Row		$se \ell > b_e \quad 2b_e t$ $se \ell < b_e \quad (b_e + \ell) t$	t_f
3 Two Staggered Rows		$b_e t$	$0.75(t_f + t)$
4 Four Staggered Rows		$se \ell > b_e \quad 2b_e t$ $se \ell < b_e \quad (b_e + \ell) t$	$0.75(t_f + t)$
5 Single Row, Skin Edge Free		$(b_{e1} + b_e/2) t$ $b_{e1} = 0.365 b_e$	t_f
6 Single Row, Padded Skin		$b_e [(t_1 + t_2)/2]$	t_f
7 Double Row, Padded Skin		$se \ell > b_e \quad 2b_e [(t_1 + t_2)/2]$ $se \ell < b_e \quad (b_e + \ell) [(t_1 + t_2)/2]$	t_f

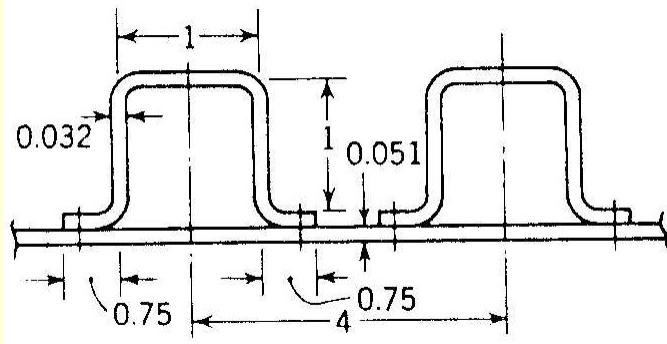


Tabela 6.5 Cálculo da Largura Efetiva para Painéis Integrais

Attachment	Configuration	Total Effective Skin Area, A_e	Effective Stiffener Flange Thickness ($t_{f,eff}$) at Skin (for calculating F_{cc})
1 Integral		$b_e t$ $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$	Calculate F_{cc} for TEE section alone, assuming the vertical leg is simply supported at each end. ②
2 Integral		$b_e t$ $t = t_1$	Calculate F_{cc} for I section alone. ③

② Column properties based on area of TEE section plus A_e .
 ③ Column properties based on area of I section plus A_e .

Exemplo



Considere o painel do Exemplo 6.7. Pede-se

- a tensão de falha local do reforçador isolado
- a largura efetiva do revestimento
- a tensão média de falha local do conjunto

Reforçadores conformados em chapa AL 7075-T6

($E = 10500$ ksi, $F_{cy} = 67$ ksi, $F_{0.7} = 70$ ksi, $n = 9.2$)

Revestimento em chapa AL 2024-T3

($E = 10700$ ksi, $F_{cy} = 40$ ksi, $F_{0.7} = 39$ ksi, $n = 11.5$).

Solução

a) tensão média de falha local do reforçador (usando o método de Gerard)

$$A_{st} = 0,032 \times (1 + 2 \times 1 + 2 \times 0,75) = 0,144 \text{ in}^2$$

Caso 4 da Tabela 6.2 $g = 3$ cortes + 8 flanges = 11; $\beta_g = 0,55$; $m = 0,85$

$$\frac{F_{st}}{F_{cy}} = 0,55 \left[\frac{11 \times 0,032^2}{0,144} \sqrt{\frac{10500}{67}} \right]^{0,85} = 0,540 < \frac{F_{cut}}{F_{cy}} \Rightarrow F_{st} = 0,54 \times 67 = 36,2 \text{ ksi}$$



Exemplo - continuação

b) **largura efetiva de revestimento**; supondo que não haja flambagem entre rebites, a Eq. (6.25) fornece

$$b_e = 1,7t \frac{E_{sk}}{E_{st}} \sqrt{\frac{E_c}{F_{st}}}$$

Como os materiais são distintos, é necessário calcular-se a razão E_{sk}/E_{st} , compatível com uma tensão de 36.2 ksi no reforçador. Aqui far-se-á uso dos modelos de Ramberg-Osgood para os materiais envolvidos. As Eqs. (1.13) e (1.17) fornecem, respectivamente, para a liga 7075-T6

$$\frac{\varepsilon_{st} E}{F_{0.7}} = \frac{f_{st}}{F_{0.7}} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{f_{st}}{F_{0.7}} \right)^{n-1} \right] = \frac{36,2}{70} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{36,2}{70} \right)^{9,2-1} \right] = 0,518 \Rightarrow \varepsilon_{st} = \frac{0,518 \times 70}{10500} = 3,453 \times 10^{-3}$$

$$E_{st} = \frac{E}{1 + (3/7)(f/F_{0.7})^{n-1}} = \frac{10500}{1 + (3/7)(36,2/70)^{9,2-1}} = 10480 \text{ ksi}$$



Exemplo (conclusão)

Para a liga 2024-T3, na mesma deformação,

$$\frac{\varepsilon_k E}{F_{0.7}} = \frac{f}{F_{0.7}} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{f}{F_{0.7}} \right)^{n-1} \right] \text{ ou } \frac{3,453 \times 10^{-3} \times 10700}{39} = \frac{f}{39} \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{f}{39} \right)^{11,5-1} \right]$$

$$\text{ou } f_k \left[1 + \frac{3}{7} \left(\frac{f_k}{39} \right)^{10,5} \right] = 36,947 \Rightarrow f_k = 33,8 \text{ ksi}$$

de modo que

$$E_{sk} = \frac{E_k}{1 + (3/7)(f_k/F_{0.7})^{n-1}} = \frac{10700}{1 + (3/7)(33,8/39)^{11,5-1}} = 9770 \text{ ksi}$$

$$b_e = 1,7t \frac{E_{sk}}{E_{st}} \sqrt{\frac{E_c}{F_{st}}} = 1,7 \times 0,051 \frac{9770}{10480} \sqrt{\frac{10700}{36,2}} = 1,39 \text{ in}$$

$$A_e = 2b_e t = 2 \times 1,39 \times 0,051 = 0,142 \text{ in}^2$$

c) tensão média de falha local do painel

$$\bar{F}_{cc} = \frac{F_{st}(A_{st} + A_e)}{A_{st} + bt} = \frac{36,2(0,144 + 0,142)}{0,144 + 4 \times 0,051} = 29,8 \text{ ksi}$$



Flambagem Entre Rebites e Enrugamento

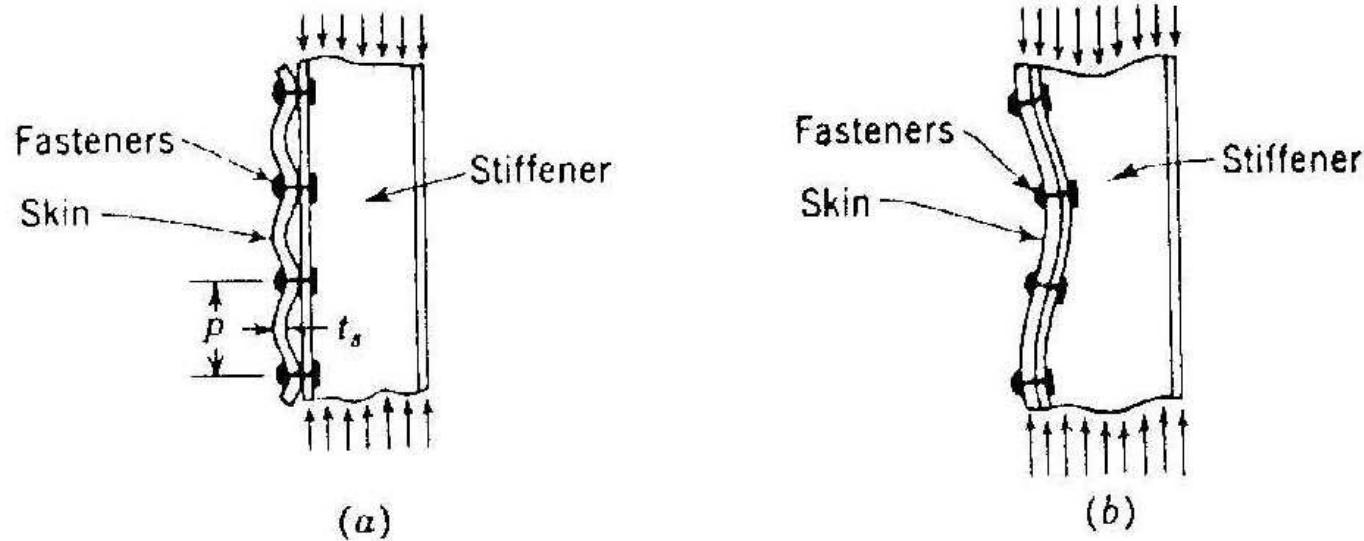


Fig. 6-30 Comparação entre (a) Flambagem entre Rebites e (b) Enrugamento do Revestimento

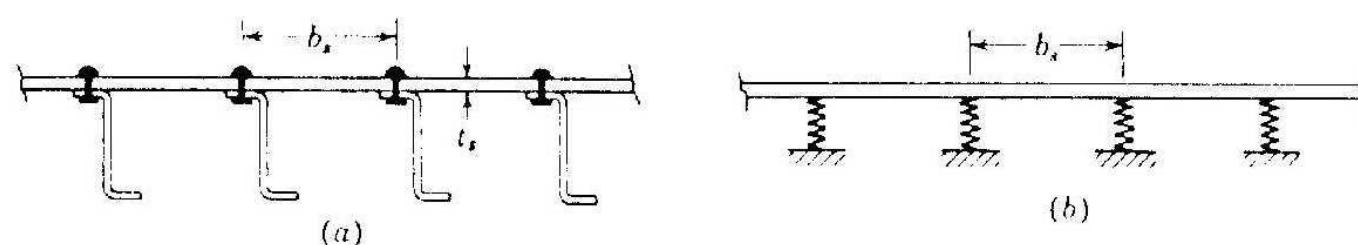


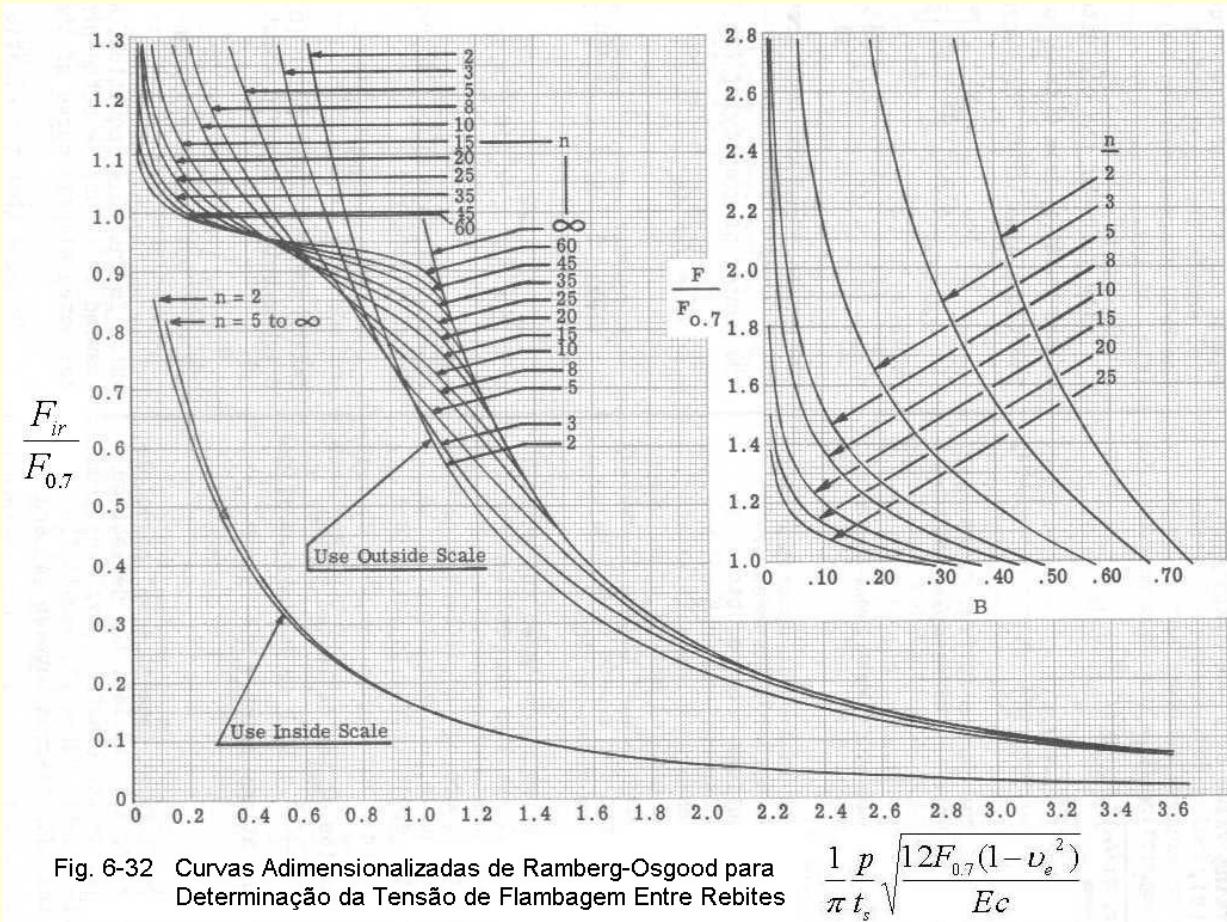
Fig. 6-31 Idealização do Enrugamento de um Painel Reforçado Longitudinalmente
(a) Painel Reforçado; (b) Idealização



Flambagem Entre Rebites

$$F_{ir} = \frac{c\pi^2 E_t}{12(1-\nu_e^2)} \left(\frac{t_s}{p} \right)^2 = \frac{4\pi^2 E_t}{12(1-\nu_e^2)} \left(\frac{\sqrt{c}}{2} \frac{t_s}{p} \right)^2$$

$$B = \frac{1}{\pi} \frac{p}{t_s} \sqrt{\frac{12F_{0.7}(1-\nu_e^2)}{Ec}}$$



Correção para
Cladding

$$\bar{F}_{ir} = \bar{\eta} F_{ir}$$



Flambagem Entre Rebites - Detalhes

Tabela 6.6 Valores Recomendados para a Tensão de Corte

Material	Cutoff Stress (F_{cy})
2024-T	$F_{cy} \left[1 + \frac{F_{cy}}{200,000} \right]$
2014-T	
6061-T	
7075-T	$1.075 F_{cy}$
18-8 (1/2 H)*	$0.835 F_{cy}$
(3/4 H)	$0.875 F_{cy}$
(FH)	$0.866 F_{cy}$
All other materials	F_{cy}

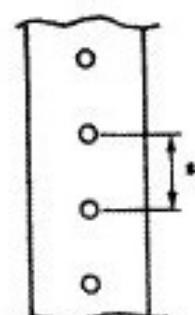
* Cold-rolled, with grain, based on MIL-HDBK-5A properties.

A NASA recomenda ainda que o espaçamento entre rebites, p , obedeça as relações

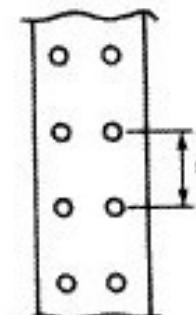
$$p = g/2 + h \quad \text{para } 0 \leq g \leq 2h$$

$$p = 2h \quad \text{para } g \geq 2h$$

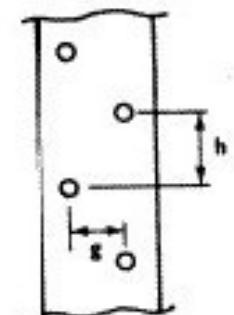
onde g e h estão definidos no esboço ao lado.



(a) Single row



(b) Double rows



(c) Staggered rows



Tensão de Flambagem Entre Rebites

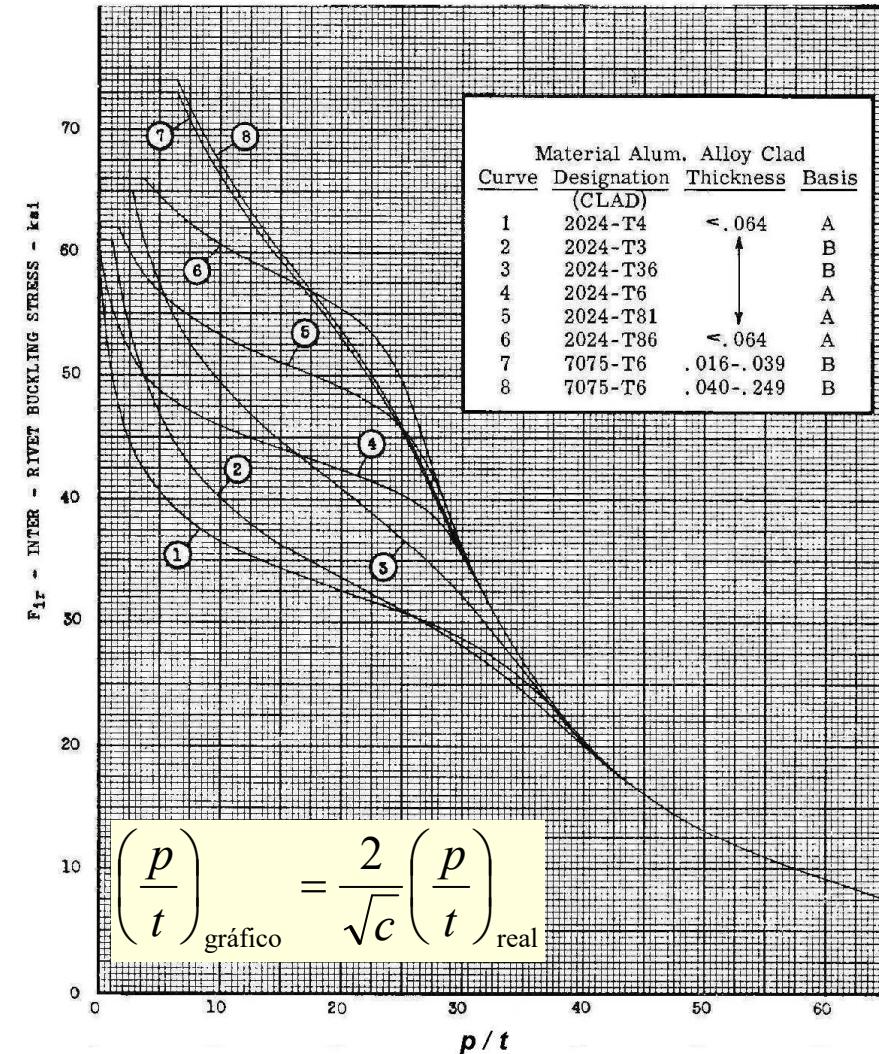
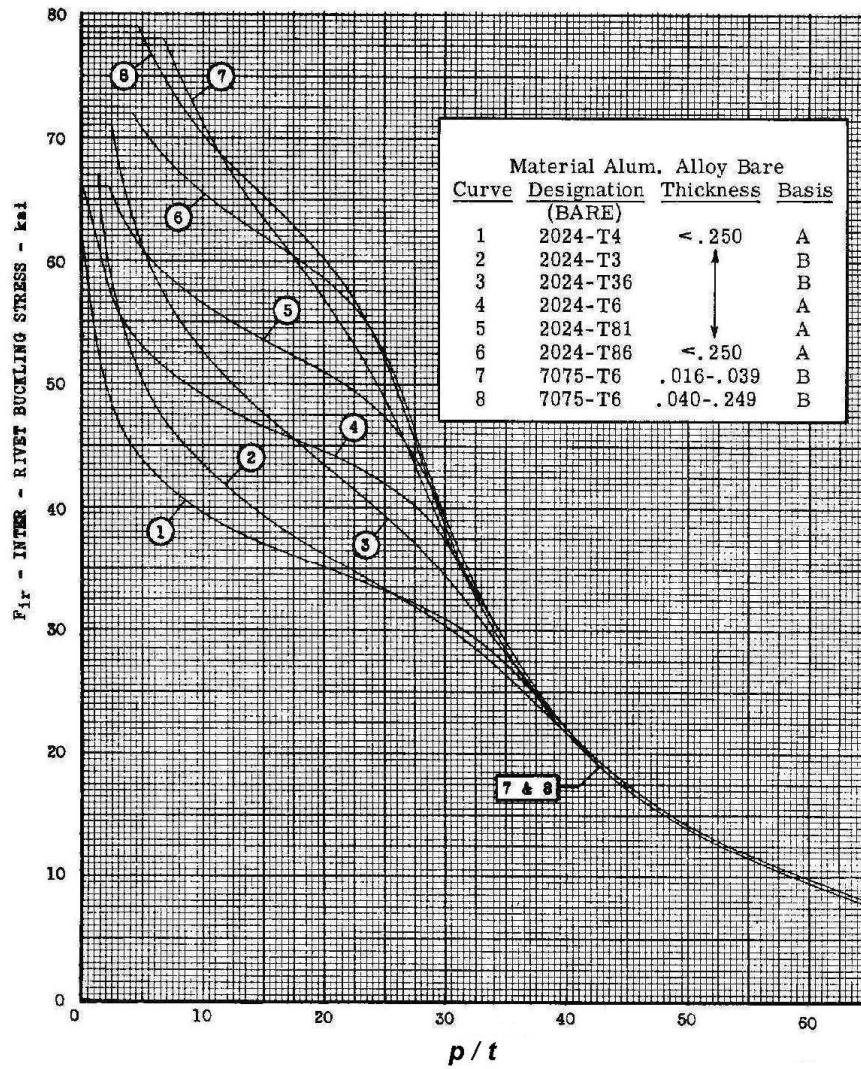


Fig. 6-33 Tensões de Flambagem entre Rebites para Coeficiente de Fixação $c = 4$



Flambagem Entre Rebites

Tabela 6-6 Coeficientes de Engastamento, c, para Cálculo de Flambagem entre Rebites

Type of fastener	c
Flat-head rivet	4
Brazier-head rivet	3
Machine-countersunk rivet	1
Dimpled-countersunk rivet	1
Spot welds	3,5

Boeing: $\frac{F_{ir}}{E_t} = 2,9 \left(\frac{p}{t_s} \right)^2$, para rebites protuberantes ou pontos de solda ($c = 3,2$)

$$\frac{F_{ir}}{E_t} = 1,9 \left(\frac{p}{t_s} \right)^2, \quad \text{para demais rebites (} c = 2,1 \text{)}$$


Flambagem Entre Rebites

Quando um painel é carregado além da capacidade de flambagem entre rebites de seu revestimento, o revestimento continuará a carregar a carga correspondente ao início da flambagem. Entretanto, o revestimento não será capaz de carregar cargas adicionais uma vez que se comporta como uma placa-coluna que, por sua vez, se comporta de forma semelhante a uma coluna (Fig. 2-25), cujas cargas de flambagem e de falha são essencialmente as mesmas. Se b_{ei} é a largura efetiva do revestimento quando a tensão de bordo for a tensão de flambagem entre rebites, $F_e = F_{ir}$, a carga que será carregada pelo revestimento após a flambagem entre rebites é $F_{ir}b_{ei}t_s$. O painel continuará a resistir cargas adicionais até que seja atingida a tensão de falha local do reforçador, F_{st} , após o que o painel falha. A carga na falha é, portanto, $F_{st}A_{st} + F_{ir}b_{ei}t_s$, onde A_{st} é a área do reforçador, e a tensão média na falha (referida à área total) é

$$(F_u)_{\text{média}} = \frac{F_{ir}b_{ei}t_s + F_{st}A_{st}}{bt_s + A_{st}}$$



Flambagem Entre Rebites

Com o uso crescente de bitolas mais espessas de revestimento, que se aproximam ou ultrapassam a espessura do reforçador, a flambagem entre rebites é raramente um fator de decréscimo na resistência de painéis reforçados curtos. Tem sido observado, entretanto, que ambos, o espaçamento entre rebites e o diâmetro, são fatores de importância considerável no que concerne atingir os níveis de resistência de painéis rebitados curtos, para que tenham índice de performance semelhante aquele dos painéis reforçados integrais.

Resultados de ensaios em painéis reforçados com longitudinais em Z indicam que a resistência de painéis de razão de esbeltez moderada (e.g., $L'/\rho_p = 35$, onde ρ_p é o raio de giração do painel compreendendo ambos, o revestimento efetivo e os reforçadores) é consideravelmente menos afetado pelo espaçamento entre rebites e diâmetro do que painéis mais curtos. Para painéis longos ($L'/\rho_p = 60$), os efeitos das configurações dos rebites são praticamente desprezíveis.



Enrugamento do Revestimento

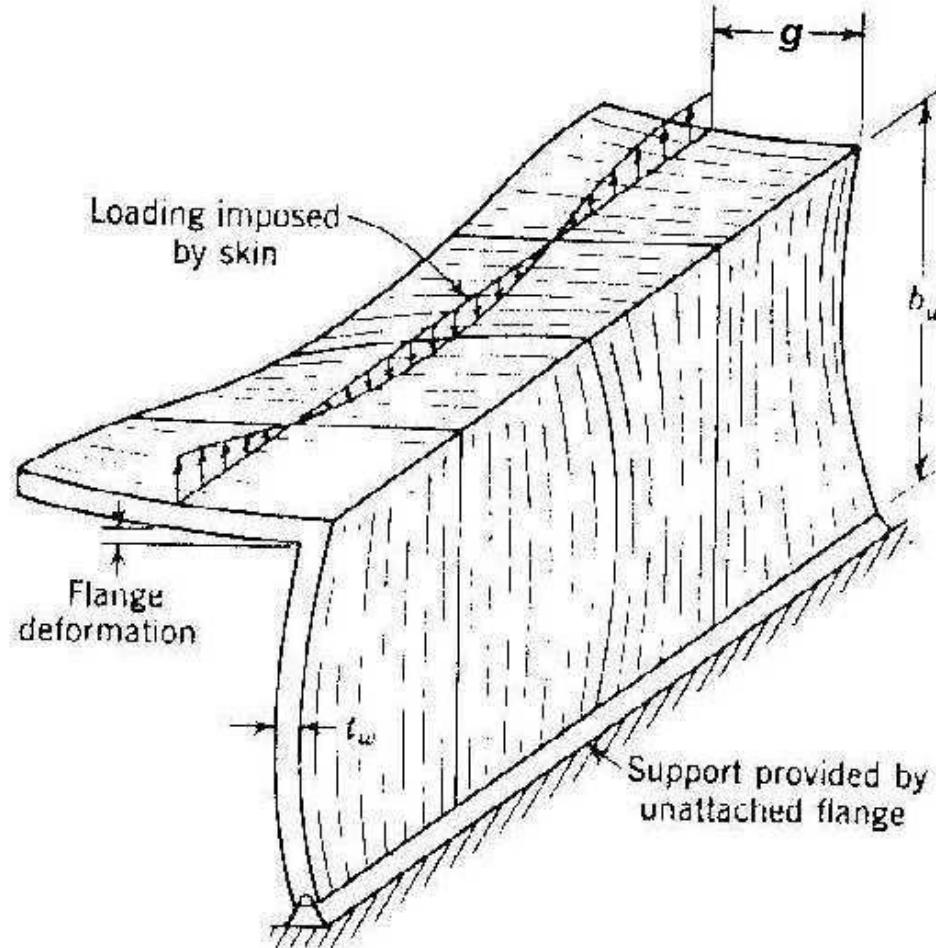


Fig. 6-34 Deformação do Flange e da Alma na Idealização do Enrugamento de um Reforçador



Enrugamento do Revestimento

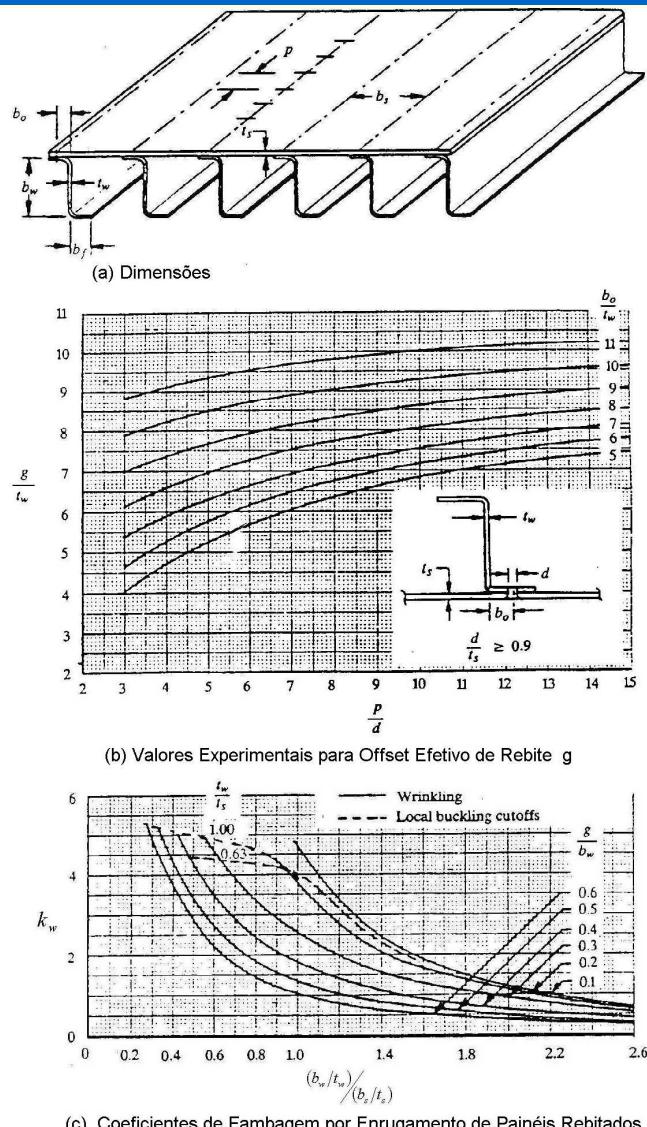


Fig. 6-35 Gráficos para Cálculo de Tensão de Flambagem por Enrugamento

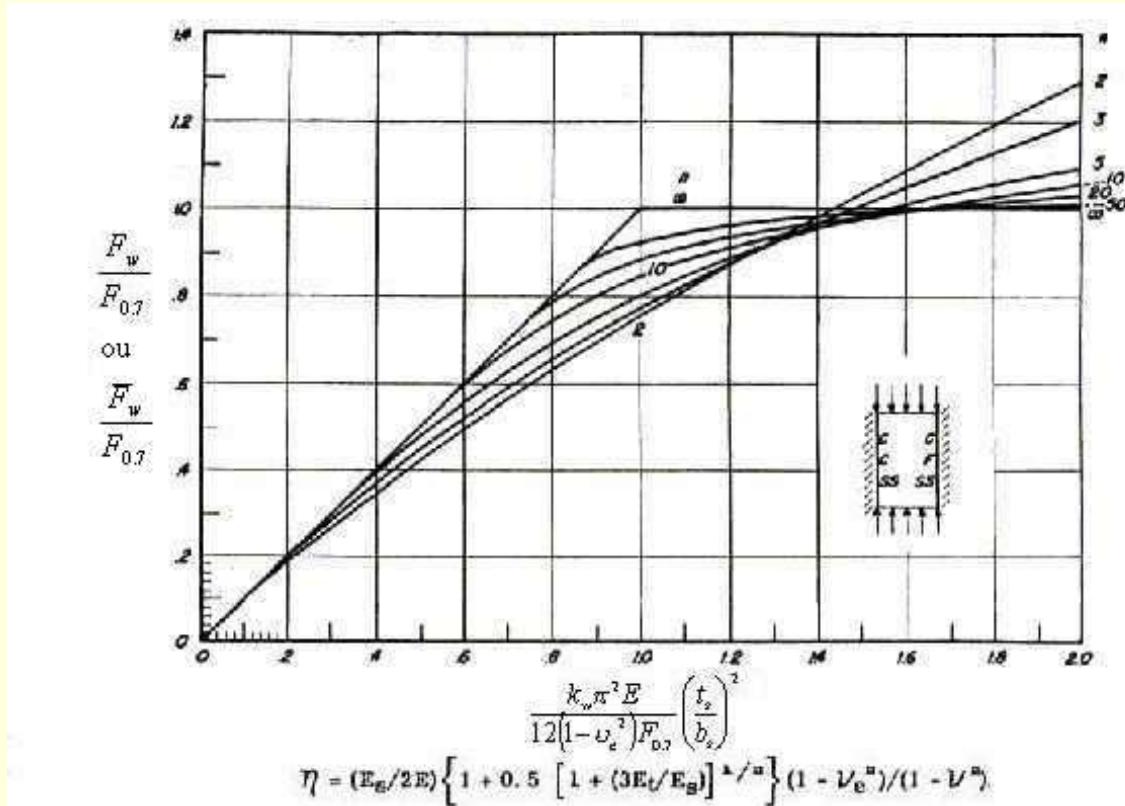


Fig. 6-36 Correção de Plasticidade para as Tensões Crítica e de Falha por Enrugamento de Revestimentos Cujo Material é Representado pelo Modelo de Ramberg-Osgood

Tensão de Falha por Enrugamento

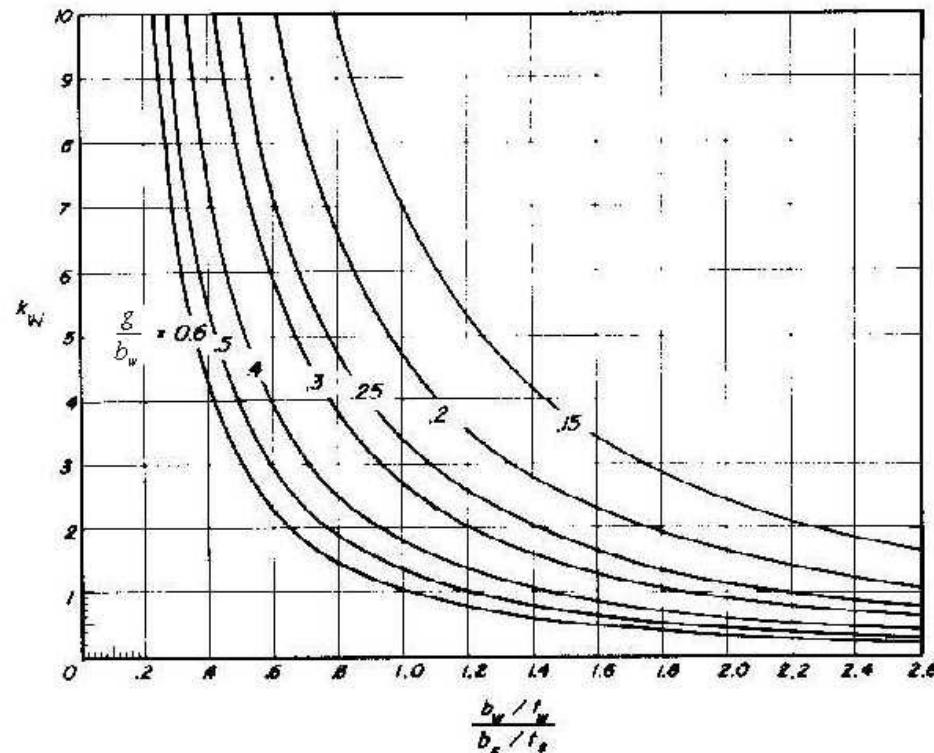


Fig. 6-37 Valores Experimentais de Coeficientes de Falha por Enrugamento de Painéis Rebitados

a menos que g/b_w seja pequeno, há pouca diferença entre as tensões de instabilidade e de falha por enrugamento do revestimento



Falha Local de Painéis Montados

Se $\bar{F}_w \leq F_{st}$, o enrugamento ocorre antes ou simultaneamente com a falha local do reforçador e $(F_u)_{\text{média}}$ é o maior dos valores obtidos das equações

$$(F_u)_{\text{média}} = \bar{F}_w \longrightarrow \text{enrugamento precipita a falha do reforçador}$$

$$(F_u)_{\text{média}} = \frac{F_{st} A_{st}}{A_{st} + b_s t_s} \rightarrow \text{reforçador excepcionalmente resistente}$$

Quando $\bar{F}_w > F_{st}$, a falha local do reforçador se dá antes de ser atingida a tensão de falha por enrugamento do revestimento. Isto significa que o revestimento poderia ter ainda alguma capacidade de absorção de carga. Neste caso é feita a hipótese de que o reforçador continua a suportar a sua carga de falha local. A falha ocorre quando o revestimento atinge a tensão de falha por enrugamento. A tensão média na falha do painel é, portanto

$$(F_u)_{\text{média}} = \frac{F_{st} A_{st} + \bar{F}_w b_s t_s}{A_{st} + b_s t_s}$$

Em nenhum caso, as tensões médias de falha do painel montado, $(F_u)_{\text{média}}$, dadas pelas equações acima, podem ser maiores do que a tensão média de falha local do painel monolítico, \bar{F}_{cc} .



Verificação da Resistência dos Rebites

$$\frac{p}{b_s} < \frac{1,27}{\sqrt{k_w}}$$

$$F_r > \frac{0.7}{E_{st}} \frac{b_s}{d} \frac{p}{d} F_w^2$$

Para que revestimento e reforçador permaneçam “colados” até a falha por enrugamento

Tensão admissível em rebite manufaturado em AL 2117-T4

$$F_r = 57 \text{ ksi} \quad \text{se} \quad \frac{d_e}{t_{\text{médio}}} \leq 1,67$$

$$F_r = \frac{190}{d_e/t_{\text{médio}}} - \frac{160}{(d_e/t_{\text{médio}})^2} \quad \text{se} \quad \frac{d_e}{t_{\text{médio}}} > 1,67$$

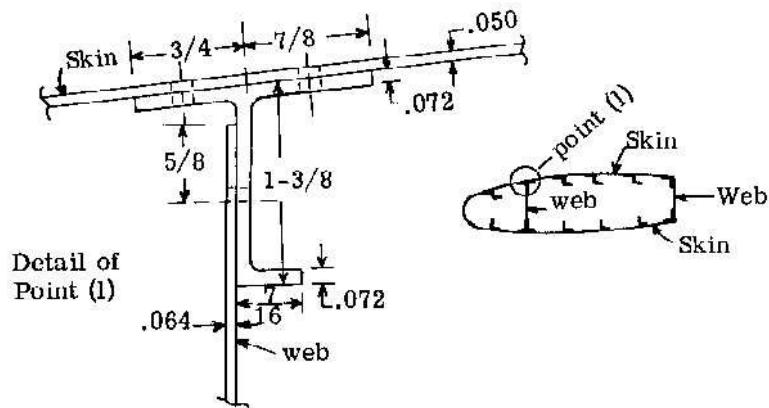
$$\frac{d_e}{d} = \sqrt{\frac{(F_r)_{\text{material}}}{(F_r)_{2117-T4}}}$$

$t_{\text{médio}}$ = espessura média chapa/flange

d_e = diâmetro efetivo



Exemplo 1



Uma estrutura de asa, de construção convencional, está mostrada no esboço. A asa é coberta por uma placa, geralmente referida como revestimento, e este revestimento é reforçado conectando elementos com seções conformadas ou extrudadas. Uma seção típica de uma asa envolve uma ou várias almas interiores e para conectar estas almas ao revestimento, um reforçador muitas vezes denominado de flange da alma ou mesa, é necessário para facilitar a conexão, como mostrado na figura.

O flange no caso deste exemplo é uma extrusão de liga de alumínio 7075-T6. O revestimento e a alma são manufaturados em liga de alumínio 7075-T6. O revestimento é conectado ao reforçador por duas fileiras de rebites de cabeça tipo Brazier de 1/8 in de diâmetro, com espaçamento de 7/8 in. A alma é conectada ao reforçador por uma fileira de rebites de cabeça chata de 3/16 in de diâmetro, espaçados de 1 in.

Pede-se determinar a tensão de falha local do reforçador, a área efetiva das chapas conectadas ao reforçador, e a carga total que é suportada pelo conjunto na condição de falha.



Exemplo 1

Uma vez que o reforçador é apoiado lateralmente pela alma e revestimento, a ação de flexão de coluna é evitada, de modo que a verdadeira resistência a cargas longitudinais de compressão da unidade se dá por falha local (tensões adicionais são produzidas nestes cantos se a alma flamba em cisalhamento e forças de tração diagonal estão agindo; mas este assunto será tratado noutro capítulo).

Dados adicionais: área do reforçador $A_{st} = 0.24 \text{ in}^2$

propriedades da extrusão 7075-T6: $E_c = 10500 \text{ ksi}$ e $F_{cy} = 70 \text{ ksi}$

propriedades das chapas 7075-T6: $E_c = 10500 \text{ ksi}$ e $F_{cy} = 70 \text{ ksi}$

O método de Gerard será utilizado para o cálculo da tensão de falha local do reforçador. $g = 1 \text{ corte} + 5 \text{ flanges} = 6$; Tabela 6.2, caso 6: $b_g = 0.67$, $m = 0.4$, $F_{cut} = 0.8F_{cy} = 56 \text{ ksi}$

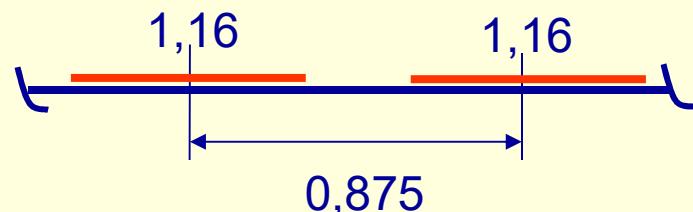
$$\frac{F_{st}}{F_{cy}} = \beta_g \left[\frac{gt^2}{A_{st}} \sqrt{\frac{E}{F_{cy}}} \right]^m = 0,67 \left[\frac{6 \times 0,072^2}{0,24} \sqrt{\frac{10500}{70}} \right]^{0,4} = 0,806 > \frac{F_{cut}}{F_{cy}} \Rightarrow F_{st} = F_{cut} = 56 \text{ ksi}$$

$$b_e = 1,7t \frac{E_{sk}}{E_{st}} \sqrt{\frac{E_c}{F_{st}}} = 1,7 \times 0,050 \sqrt{\frac{10500}{56}} = 1,16 \text{ in} \quad \text{para o revestimento}$$

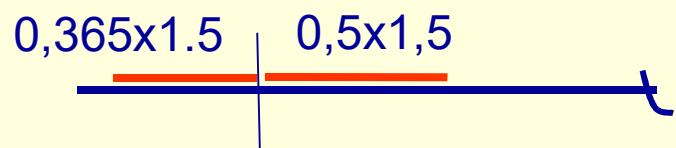
$$b_e = 1,7t \frac{E_{sk}}{E_{st}} \sqrt{\frac{E_c}{F_{st}}} = 1,7 \times 0,064 \sqrt{\frac{10500}{56}} = 1,50 \text{ in} \quad \text{para a alma}$$



Exemplo 1



$$(A_e)_{\text{revestimento}} = (1,16 + 0,875) \cdot 0,050 = 0,1 \text{ in}^2$$



$$(A_e)_{\text{alma}} = (0,365+0,5)1,5 \cdot 0,064 = 0,083 \text{ in}^2$$

$$P_u = [A_{st} + (A_e)_{\text{revestimento}} + (A_e)_{\text{alma}}] F_{st} = (0,24 + 0,102 + 0,083) \times 56 = 23,8 \text{ kips}$$

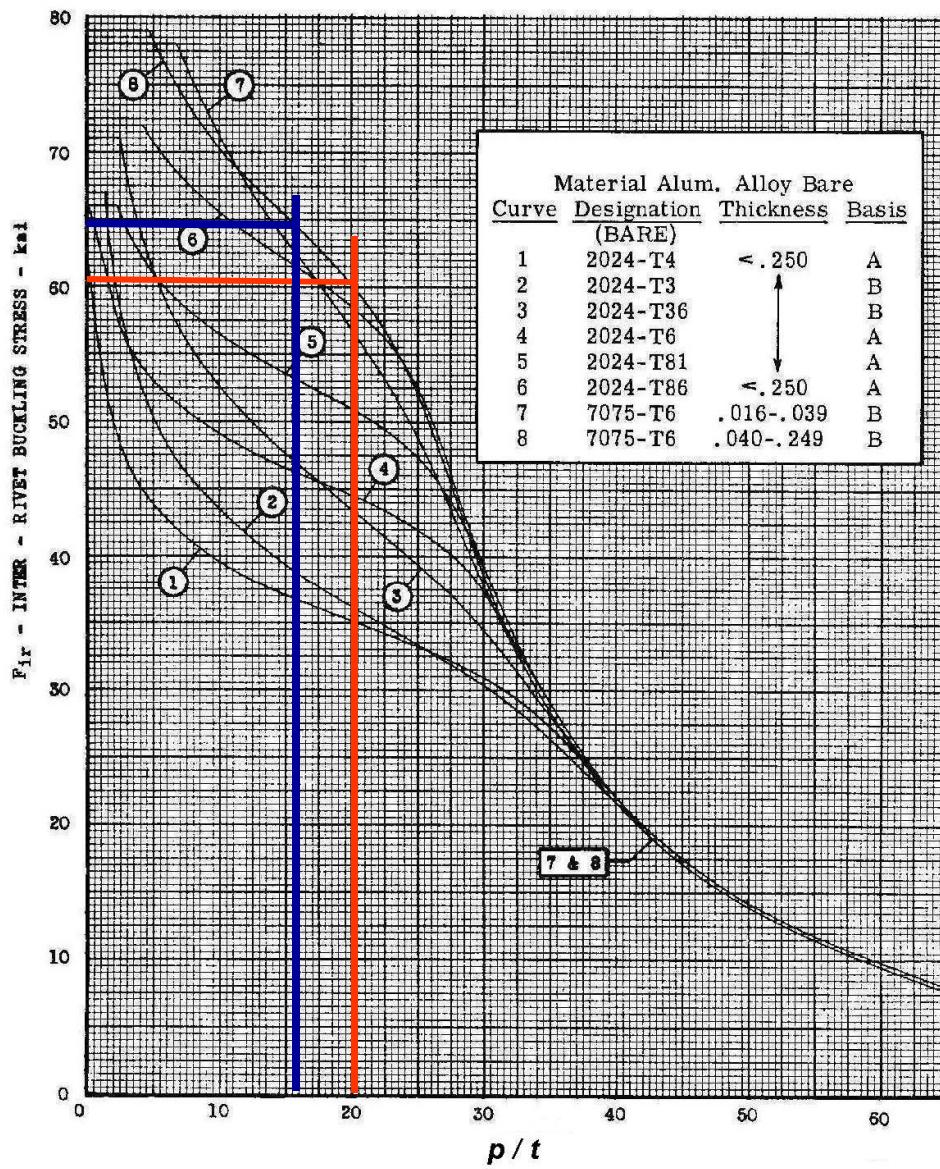
rebites do revestimento são do tipo Brazier com espaçamento $p = 7/8$. De acordo com a Tabela 6.6, o coeficiente de engastamento para este tipo de rebite é $c = 3$. Portanto, para uso da Fig. 6-33 é necessário fazer uso da Eq. (6.30):

$$\left(\frac{p}{t} \right)_{\text{gráfico}} = \frac{2}{\sqrt{c}} \left(\frac{p}{t} \right)_{\text{real}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{7/8}{0,050} \right) = 20,2$$

Os rebites da alma são do tipo cabeça chata, com $c = 4$. O espaçamento é de 1,00 in, de modo que, com $p/t = 1,00 / 0,064 = 15,6$



Exemplo 1



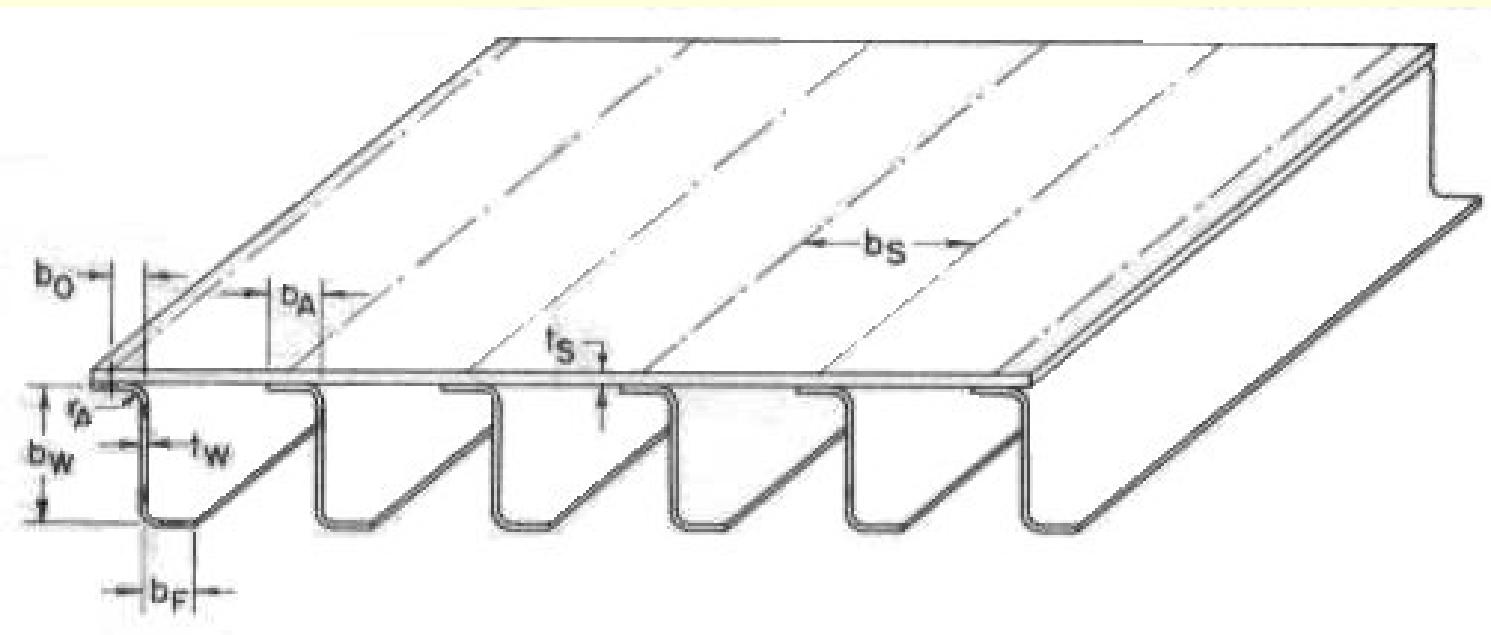
Revestimento: $F_{ir} = 60$ ksi

Alma: $F_{ir} = 64,5$ ksi

Como a tensão de flambagem entre rebites é maior do que a tensão de falha local do reforçador, a flambagem entre rebites não ocorrerá



Exemplo 2



A figura mostra um painel reforçado composto de revestimento e reforçadores conformados. O material é liga de alumínio 2024-T3 ($E_c = 10700$ ksi, $F_{0.7} = 39$ ksi, $n = 11,5$, $F_{cy} = 40$ ksi). O problema é determinar a tensão de falha em compressão, para um pequeno comprimento da unidade. Os dados gerais do painel são:

$$t_w = 0,064 \text{ in}; \quad b_w = 2,437 \text{ in}; \quad b_A = 0,593 \text{ in}; \quad t_s = 0,064 \text{ in}; \quad b_f = 0,905 \text{ in}; \quad b_0 = 0,905 \text{ in}; \\ b_s = 2,00 \text{ in}; \quad \text{rebites tipo Brazier em AL 2117 - T3, diâmetro } 3/32 \text{ in, espaçamento } 3/4 \text{ in}$$



Exemplo 2

•a) tensão de falha do reforçador agindo sozinho

A área do reforçador é: $A_{st} = (0,593 + 2,437 + 0,905)0,064 = 0,252 \text{ in}^2$

Para o método de Gerard, a Tabela 6-2 e Eq. (6.16) fornecem,

$$\frac{F_{st}}{40} = 3,2 \left[\frac{0,064^2}{0,252} \left(\frac{10700}{40} \right)^{1/3} \right]^{0,75} = 0,589 < \frac{F_{cut}}{40} = 2 \left(\frac{0,064}{2,437} \right)^{1/3} = 0,594 \Rightarrow F_{st} = 23,6 \text{ ksi}$$

•b) tensão de falha local do painel, considerado monolítico

A Tabela 6-3 fornece, para o método de Gerard, $g = (8 \times 6 - 1)/6 = 7,83$, $m = 0,85$, $\beta_g = 0,56$ e $F_{cut} = F_{cy}$. A área total é: $A = 0,252 + 2 \times 0,064 = 0,38 \text{ in}^2$ de modo que a Eq. (6.23) fornece

$$\frac{\bar{F}_{cc}}{40} = 0,56 \left[\frac{7,83 \times 0,064 \times 0,064}{0,38} \sqrt{\frac{10700}{40}} \right]^{0,85} = 0,737 < 1 \Rightarrow \bar{F}_{cc} = 29,5 \text{ ksi}$$



Exemplo 2

- c) tensão de flambagem entre rebites

Para rebites tipo Brazier, $c = 3$. O espaçamento entre rebites é $p = \frac{3}{4}$ in.

Em consequência, o parâmetro B , dado pela Eq. (6.29), é

$$B = \frac{1}{\pi} \frac{p}{t_s} \sqrt{\frac{12F_{0.7}(1-\nu_e^2)}{Ec}} = \frac{1}{\pi} \frac{0,75}{0,064} \sqrt{\frac{12 \times 39(1-0,3^2)}{10700 \times 3}} = 0,430$$

Com este valor de B e $n = 11,5$, a Fig. 6-32 fornece $F_{ir}/F_{0.7} = 1,00$, de modo que $F_{ir} = 39$ ksi, bastante acima das tensões de falha do reforçador e/ou painel monolítico.

- d) falha por enrugamento do revestimento

Para $p/d = 0,75/0,0937 = 8$ e $b_0/t_w = 0,343/0,064 = 5,36$, a Fig. 6-35b fornece $g/t_w = 6,5$. Para $(b_w/t_w)/(b_s/t_s) = (2,437 \times 0,064)/(2,00 \times 0,064) = 1,22$ e $g/b_w = 6,5 \times 0,064/2,437 = 0,17$, a Fig. 6-37 fornece $k_w = 4,5$, de modo que, usando a Fig. 6-36,

$$\frac{k_w \pi^2 E}{12(1-\nu_e^2)F_{0.7}} \left(\frac{t_s}{b_s} \right)^2 = \frac{4,5 \pi^2 10700}{12 \times 0,91 \times 39} \left(\frac{0,064}{2,00} \right)^2 = 1,14 \text{ e } n = 11,5 \Rightarrow \frac{\bar{F}_w}{39} = 0,9 \Rightarrow \bar{F}_w = 35,1 \text{ ksi}$$

Como a tensão de falha por enrugamento é maior do que a tensão de falha local do painel monolítico, ela não é crítica.



Exemplo 2

Os resultados indicam que a tensão de falha local para o reforçador sozinho, de 23,6 ksi, é o menor valor, de maneira que o reforçador é instável, falhando primeiro. Em consequência, a tensão média última do painel é dada pela Eq. (6.38)

$$(F_u)_{\text{média}} = \frac{F_{st} A_{st} + \bar{F}_w b_s t_s}{A_{st} + b_s t_s} = \frac{23,6 \times 0,252 + 35,1 \times 0,128}{0,252 + 0,128} = 27,5 \text{ ksi}$$

Como este valor é menor do que a tensão de falha local do painel monolítico, ele representa a tensão média de falha do painel dado. A capacidade última de carregamento do painel é $P_u = 27,5 \times 0,38 = 10,4 \text{ kips}$

e) verificação dos rebites

$$\frac{p}{b_s} < \frac{1,27}{\sqrt{k_w}} \quad \text{ou} \quad \frac{3/4}{2,0} = 0,375 < \frac{1,27}{\sqrt{k_w}} = \frac{1,27}{\sqrt{4,5}} = 0,60 \quad \text{OK}$$

$$\frac{d_e}{t_{\text{médio}}} = \frac{3/32}{0,064} = 1,47 < 1,67 \Rightarrow F_r = 57 \text{ ksi} \quad \text{tensão admissível}$$

$$F_r = 57 > \frac{0,7}{E_{st}} \frac{b_s}{d} \frac{p}{d} F_w^2 = \frac{0,7}{10700} \frac{2,0}{3/32} \frac{3/4}{3/32} 35,1^2 = 13,8 \text{ ksi} \Rightarrow \text{OK}$$

