
ESTRUTURAS AEROESPACIAIS II

Prof. Mauricio V. Donadon

ITA-IEA



Falha de Painéis Reforçados

Tipos de Análise

- **Coluna “Reforçador-Revestimento”**

Reforçador + Área Efetiva de Revestimento

Resistência do reforçador normalmente limitada pela falha local

Revestimento normalmente flamba antes de ser atingida a carga final

- **Painel com Reforçadores Discretos**

Revestimento e reforçadores tratados como uma unidade

Tensões de flambagem local do reforçador e entre rebites da chapa normalmente não atingidas antes da carga final

- **Placas Ortotrópicas**

Propriedades dos reforçadores “distribuídas” no revestimento



Coluna “Reforçador-Revestimento”

Modos de Falha “puros”:

Flambagem em Flexão

Flambagem em Torção

Flambagem Local seguida de Falha Local

- Em geral, modo de falha em torção é acoplado ao de flexão (exceto para seções com dupla simetria ou ponto-simétricas)
- Seção fechada - modo crítico é o de “falha local – flexão”
- Seção aberta simétrica ou ponto simétrica – “falha local – flexão” ou torção pura
- Seção aberta assimétrica – “falha local – flexão” ou flexo-torção



Comprimento de Semi-Onda e Modo de Falha

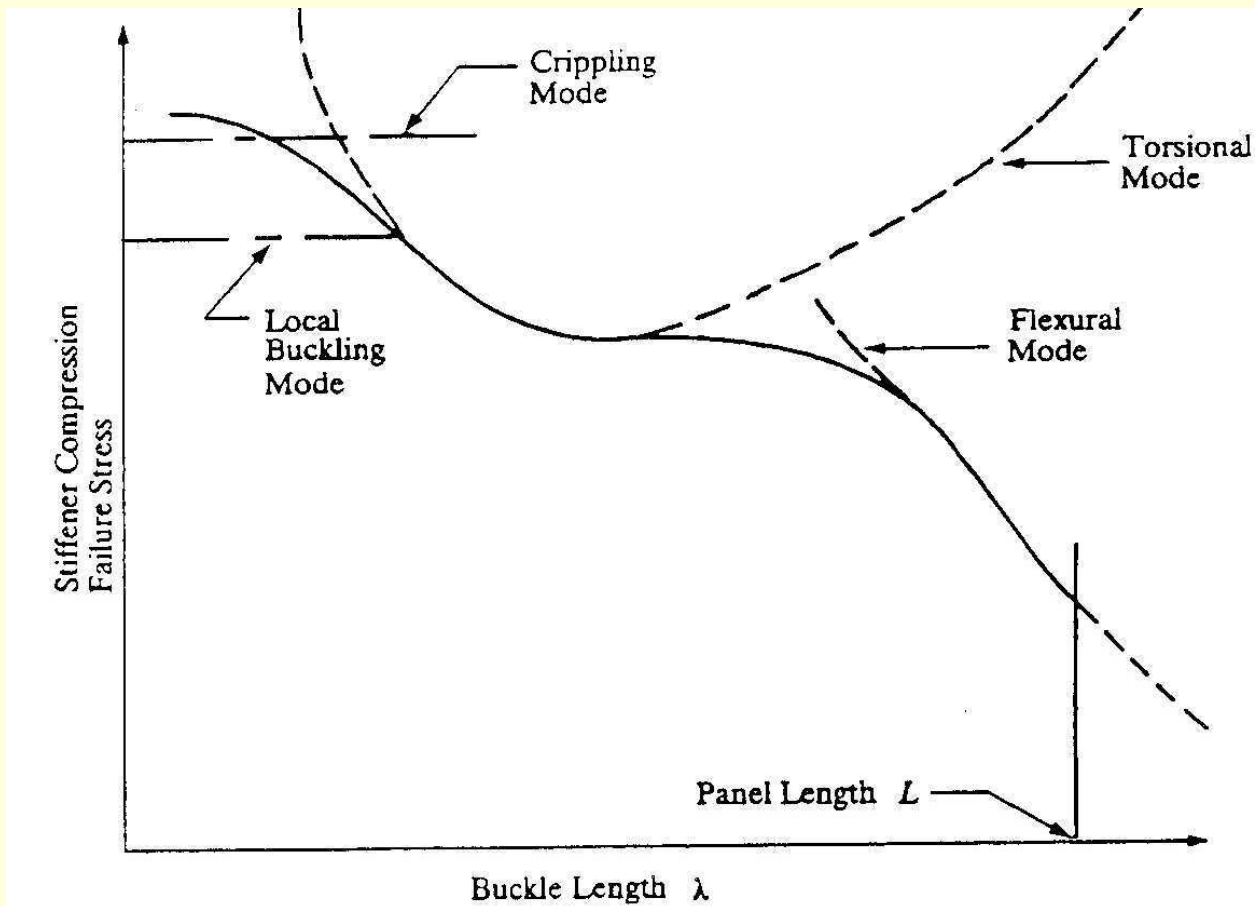
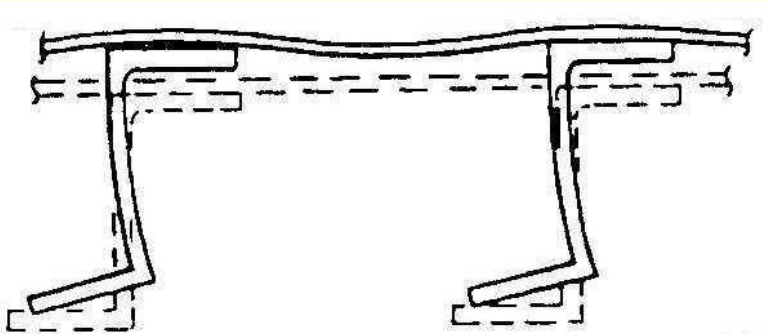


Fig. 6-39 Relação Característica entre Comprimento de Flamba e Modo de Flambagem

Modo “Falha Local – Flexão”



Modo de Falha: Falha Local + Flexão

$$\frac{F_{co}}{2} \leq F_c \leq F_{cc} \Rightarrow F_c = F_{co} \left[1 - \frac{F_{co} (L'/\rho)^2}{4\pi^2 E_c} \right]$$

$$F_c \leq \frac{F_{co}}{2} \Rightarrow F_c = \frac{\pi^2 E}{(L'/\rho)^2}$$

$$F_{co} = \phi \left(1 - \sqrt{1 - 2 \frac{F_{cc}}{\phi}} \right) \quad \phi = \frac{2\pi^2 E_c}{12,5^2}$$

F_{cc} = tensão média de falha local do reforçador

E_c = módulo de Young em compressão

L' = comprimento efetivo do painel = L/\sqrt{c}

c = coeficiente de engastamento nas extremidades do painel

ρ = raio de giração do reforçador mais a área efetiva de revestimento



Modo “Falha Local – Flexão”

Procedimento Passo-a-Passo

- ✓ Passo 1: Determine a tensão de falha local, F_{cc} , do reforçador sem a largura efetiva de revestimento, e calcule o parâmetro f ;
- ✓ Passo 2: Estime a tensão de falha, F_c , da coluna composta do reforçador e área efetiva de revestimento;
- ✓ Passo 3: Determine a área efetiva de revestimento, baseada no valor estimado de F_c , como mostrado na seção 6.11;
- ✓ Passo 4: Compute ρ e L'/ρ usando a Fig. 6-40 ou

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{st}}\right)^2 = \frac{1 + \xi \left[1 + (e / \rho_{st})^2\right]}{(1 + \xi)^2}, \text{ onde } \xi = \frac{A_e}{A_{st}}$$

onde, e = distância entre o centróide do reforçador e a superfície média do revestimento; A_e = área efetiva do revestimento, A_{st} = área da seção transversal do reforçador; ρ_{st} e ρ = raios de giração, respectivamente, do reforçador e da combinação reforçador-revestimento.

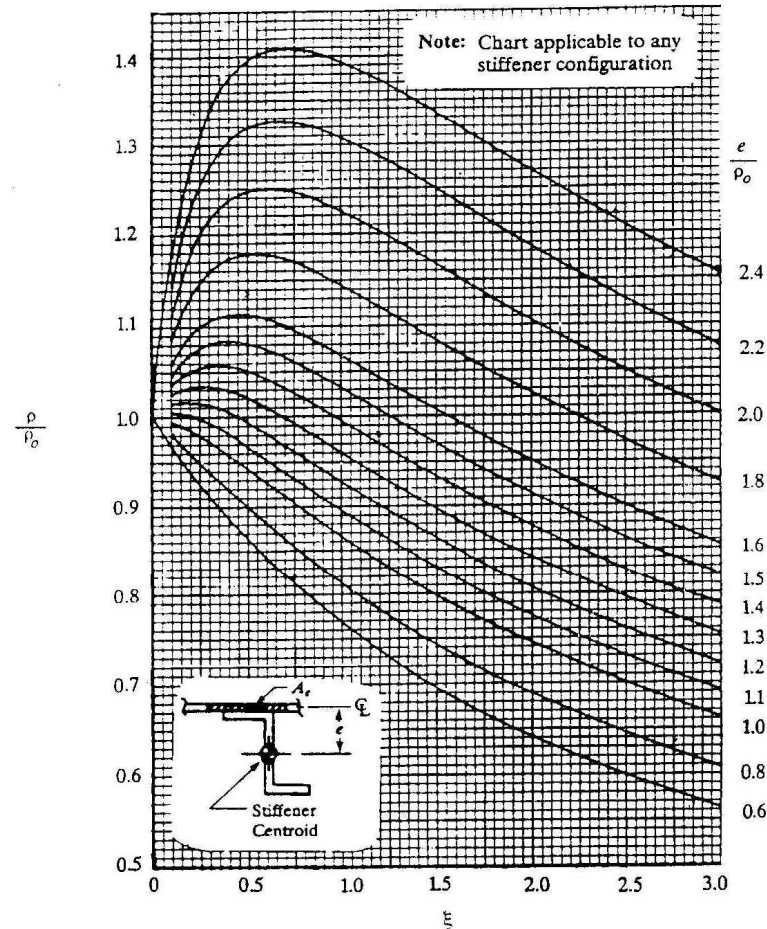


Modo “Falha Local – Flexão”

- ✓ Passo 5: Compute F_c usando as Eqs. (6.43)
 - ✓ Passo 6: Compare a F_c computada no Passo 5 com aquela do Passo 2; se diferente, itere a partir do Passo 2 com o novo valor de F_c .
 - ✓ Passo 7: Compute a tensão média no painel $\bar{F}_c = \frac{F_c (A_{st} + A_e)}{A_{st} + b_s t_s}$
 - ✓ Passo 8: Compute a margem de segurança em tensões $MS = \frac{\bar{F}_c}{f_c} - 1$
- onde f_c é a tensão de compressão aplicada no painel.



Raio de Giração do Reforçador + Chapa Efetiva



$$\left(\frac{\rho}{\rho_o} \right)^2 = \frac{1 + \xi [1 + (e/\rho_o)^2]}{(1 + \xi)^2}$$

ρ_o = Stiffener radius of gyration (see BDM-6010)
 ρ = Radius of gyration of skin-stiffener combination

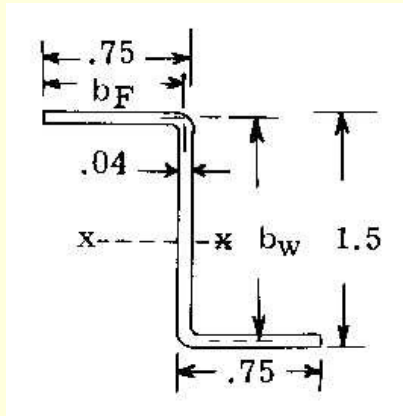
$$\xi = \frac{A_e}{A_{st}}$$

A_e = Effective skin area
 A_{st} = Stiffener area

Fig. 6-41 Raio de Giração da Combinação Reforçador - Área Efetiva de Revestimento



Exemplo



O reforçador da figura, manufaturado de chapa conformada de liga de alumínio 7075-T6 ($E_c = 10500$ ksi; $F_{cy} = 67$ ksi), é um de quatro reforçadores rebitados a uma placa de espessura $0,025$ in, do mesmo material. O painel tem comprimento de 30 in e o coeficiente de engastamento é $c = 1,5$, ou seja, $L' = L/\sqrt{c} = 30/\sqrt{1,5} = 24,49$ in

Ache a carga que o painel suporta na condição de falha.

Suponha que o espaçamento entre os rebites seja tal a prevenir a flambagem entre rebites.



Exemplo (continuação)

Passo 1: Calculando a tensão de falha local do reforçador pelo Método da Boeing, da Tabela 6.1, $m = 0,80$; $B_{10} = 0,05275$; $g_f = 2,65$
Os dois flanges têm uma borda livre, $b_n = 0,75 - 0,02 = 0,73$ in, $t_n = 0,04$ in , de modo que a Eq. (6.13) dá

$$\frac{F_{cc1}}{\sqrt{F_{cy}E}} = \frac{F_{cc1}}{\sqrt{67 \times 10500}} = \frac{F_{cc1}}{838,75} = \frac{B_{10}}{[b_n/(10g_ft)]^m} = \frac{0,05275}{[0,73/(10 \times 1 \times 0,04)]^{0,80}} = 0,0326$$

ou $F_{cc1} = F_{cc3} = 0,0326 \times 838,75 = 27,34$ ksi ; $P_{cc1} = P_{cc3} = 27,34 \times 0,73 \times 0,04 = 0,798$ kips

A alma tem zero bordas livres, $b_n = 1,5 - 0,04 = 1,46$ in, $t_n = 0,04$ in , de modo que a Eq. (6.13) dá

$$\frac{F_{cc2}}{838,75} = \frac{0,05275}{[1,46/(10 \times 2,65 \times 0,04)]^{0,80}} = 0,0408 \Rightarrow F_{cc2} = 34,25 \text{ ksi} \Rightarrow P_{cc2} = 2,000 \text{ kips}$$

$$F_{cc} = \frac{2 \times 0,798 + 2,000}{(2 \times 0,73 + 1,46)0,04} = 30,8 \text{ ksi} \Rightarrow \phi = \frac{2\pi^2 E_c}{12,5^2} = \frac{2\pi^2 10500}{12,5^2} = 1326,47$$

$$F_{co} = \phi \left(1 - \sqrt{1 - 2 \frac{F_{cc}}{\phi}} \right) = 1326,47 \left(1 - \sqrt{1 - 2 \frac{30,8}{1326,47}} \right) = 31,17 \text{ ksi}$$



Exemplo (continuação)

Passo 2: Seja $F_c = 25$ ksi;

Passo 3:

$$b_e = 1,7t_s \sqrt{\frac{E_c}{F_c}} = 1,7 \times 0,025 \sqrt{\frac{10500}{25}} = 0,871 \text{ in}$$

Passo 4:

$$I_{st} = 2 \left[\frac{0,75 \times 0,04^3}{12} + 0,75 \times 0,04 \times (0,75 - 0,02)^2 \right] + \frac{0,04 \times (1,5 - 0,08)^3}{12} = 0,0415 \text{ in}^4$$

$$A_{st} = 2 \times 0,75 \times 0,04 + (1,5 - 0,08) \times 0,04 = 0,117 \text{ in}^2 \Rightarrow \rho_{st} = \sqrt{\frac{I_{st}}{A_{st}}} = \sqrt{\frac{0,0415}{0,117}} = 0,596 \text{ in}$$

$$\xi = \frac{A_e}{A_{st}} = \frac{0,871 \times 0,025}{0,117} = 0,186; \quad e = 0,75 + 0,0125 = 0,7625 \text{ in}$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_{st}} \right)^2 = \frac{1 + \xi [1 + (e/\rho_{st})^2]}{(1 + \xi)^2} = \frac{1 + 0,186 [1 + (0,7625/0,596)^2]}{(1 + 0,186)^2} = 1,060 \Rightarrow \rho = 0,614 \text{ in}$$

Passo 5:

$$F_c = F_{co} \left[1 - \frac{F_{co} (L'/\rho)^2}{4\pi^2 E_c} \right] = 31,17 \left[1 - \frac{31,17 (24,49/0,614)^2}{4\pi^2 10500} \right] = 27,4 \text{ ksi}$$



Exemplo (conclusão)

Passo 2a: Seja $F_c = 27,4$ ksi;

Passo 3a: $b_e = 1,7t_s \sqrt{\frac{E_c}{F_c}} = 1,7 \times 0,025 \sqrt{\frac{10500}{27,4}} = 0,832$ in

Passo 4a: $\xi = \frac{A_e}{A_{st}} = \frac{0,832 \times 0,025}{0,117} = 0,178$; $e = 0,75 + 0,0125 = 0,7625$ in

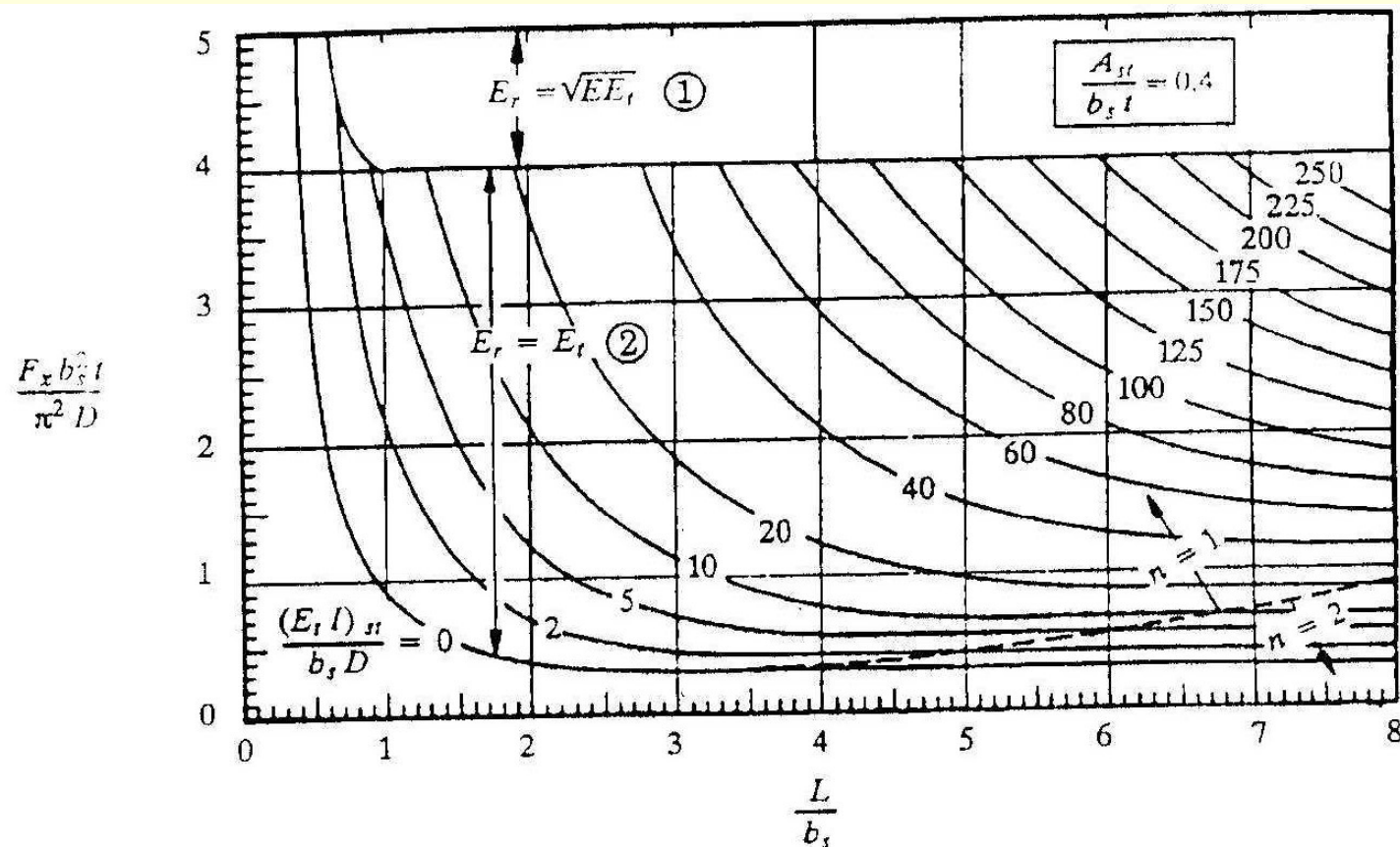
Passo 5a: $\left(\frac{\rho}{\rho_{st}}\right)^2 = \frac{1 + \xi[1 + (e/\rho_{st})^2]}{(1 + \xi)^2} = \frac{1 + 0,178[1 + (0,7625/0,596)^2]}{(1 + 0,178)^2} = 1,059 \Rightarrow \rho = 0,613$ in

Passo 6: $F_c = F_{co} \left[1 - \frac{F_{co}(L'/\rho)^2}{4\pi^2 E_c} \right] = 31,17 \left[1 - \frac{31,17(24,49/0,613)^2}{4\pi^2 10500} \right] = 27,4$ ksi

$$P_c = 4F_c(A_{st} + A_e) = 4 \times 27,4(0,117 + 0,832 \times 0,025) = 15,1 \text{ kips}$$



Painéis com Reforçadores Discretos



Curvas para 4 valores de $A_{st}/b_s t$, para painéis com 1, 2, 3 e infinitos reforçadores

① Skin buckles between stiffeners

② Skin and stiffeners buckle simultaneously

Fig. 6-43 Tensão Crítica para Painéis sob Compressão Longitudinal
Dois Reforçadores Longitudinais



Painéis com Reforçadores Discretos

Modificação do momento de inércia do reforçador

$$I = I_0 + \frac{A_{st} Z^2}{1 + \left(\frac{A_{st}}{K_1 b_s t_s} \right)}$$

I_0 é o momento de inércia dos reforçadores em torno do eixo centroidal paralelo ao revestimento;

Z é a distância do centróide do reforçador ao plano médio do revestimento;

K_1 é um coeficiente para modificação do momento de inércia do reforçador dado pela Fig. 6-41; este coeficiente depende do alongamento L/b_s , e o número de semi-ondas n , na direção longitudinal do painel;

A_{st} é a área da seção transversal do reforçador.

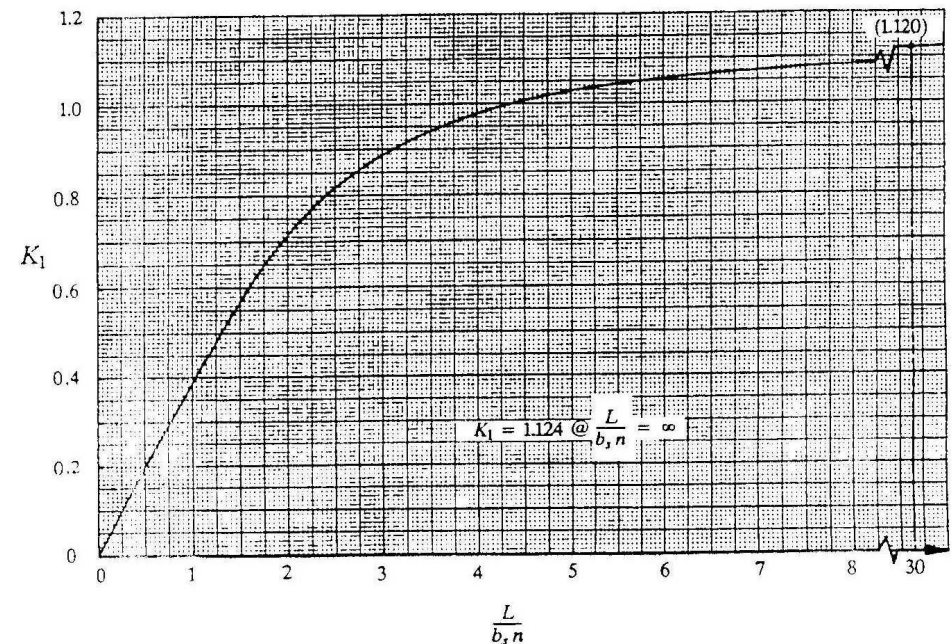


Fig. 6-41 Coeficiente para Cálculo do Momento de Inércia Modificado de Reforçador



Análise, Passo-a-Passo

- Passo 1: Calcule $L/b_s n$, com $n = 1$ como primeira aproximação (para painéis de comprimento infinito, $L/b_s n = \infty$);
- Passo 2: Determine o coeficiente K_1 , da Fig. 5-41;
- Passo 3: Calcule o momento de inércia modificado do reforçador, usando a Eq. (6.44);
- Passo 4: Calcule $(E_t I)_{st} / (b_s D)$, usando um valor assumido para o módulo tangente do reforçador e o valor de I calculado no Passo 3; na expressão acima, $D = E_r t_s^3 / [12(1 - \nu_e^2)]$ é a rigidez em flexão do revestimento, cujo módulo reduzido E_r é dado, ou por E_t , o módulo tangente do revestimento, ou por $\sqrt{E E_t}$ como mostrado nas curvas de análise;
- Passo 5: Do gráfico apropriado para tensões críticas (Figs. 6-42 a 6-45), determine n na interseção da curva $(E_t I)_{st} / (b_s D)$ apropriada com a vertical passando pelo valor L/b_s . Use a Fig. 6-45 para painéis com 4 ou mais reforçadores;



Análise, Passo-a-Passo

Passo 6: Se o n mostrado no gráfico tem o mesmo valor que foi assumido, proceda para o Passo 7; se é diferente, itere do Passo 1 com um novo valor de n ;

Passo 7: Determine $F_x b_s^2 / (\pi^2 D)$ das Figs. 6-42-6-45 (Fig. 6-46 para painéis infinitamente longos)

Passo 8: Compute a tensão crítica de compressão, F_x ;

Passo 9: Determine os módulos tangentes E_t para os materiais do reforçador e para do revestimento correspondente à tensão F_x ; se estes módulos assim determinados estiverem razoavelmente perto dos módulos assumidos no Passo 4 (dentro de $\pm 3\%$) proceda para o Passo 10; de outra forma, itere a partir do Passo 4 com novos valores de E_t .

Passo 10: Verifique se as tensões de flambagem local do reforçador e de flambagem entre rebites do revestimento são realmente maiores do que F_x ;

Passo 11: Compute a margem de segurança para a tensão de compressão uniaxial longitudinal, $MS = F_x / f_x - 1$ onde f_x é a tensão longitudinal de compressão uniaxial aplicada

