

ESTRUTURAS METÁLICAS VIGAS DE ALMA CHEIA

Prof. Alexandre Augusto Pescador Sardá

Vigas de Alma Cheia



Vigas de Alma Cheia

Conceitos gerais:

- As almas das vigas metálicas servem principalmente para ligar as mesas e absorver os esforços cortantes;
- Por razões econômicas, procura – se concentrar massas nas mesas para obter maior inércia, reduzindo a espessura da alma;
- A alma da viga é dimensionada basicamente para a condição de flambagem sob ação de tensões cisalhantes;

Vigas de Alma Cheia

PROJETO:

Calcula-se o momento e o esforço cortante resistentes de projeto.

Compara-se com os respectivos esforços solicitantes de projeto.

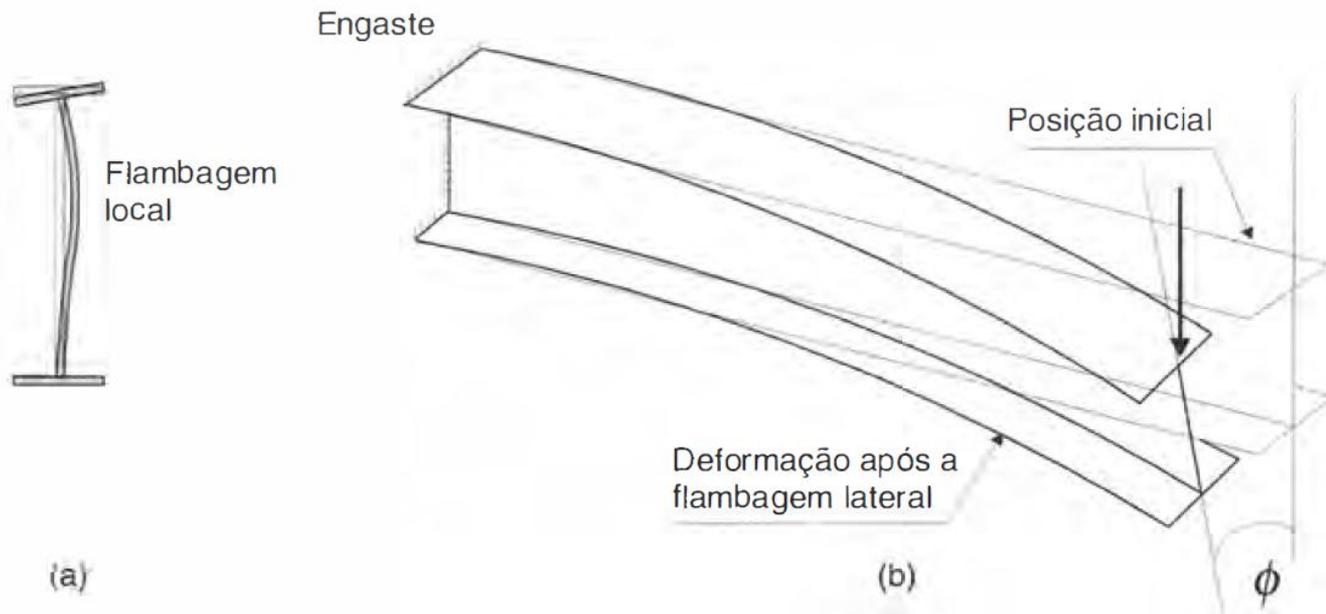
Verifica-se os deslocamentos no estado limite de utilização.

Vigas de Alma Cheia

Flambagem **local**: perda de estabilidade das chapas comprimidas componentes do perfil.

Flambagem **lateral**: a viga perde seu equilíbrio no plano principal de flexão e passa a apresentar deslocamentos laterais e rotações de torção.

Para evitar flambagem de uma viga I, cuja rigidez à torção é muito pequena, é preciso prover contenção lateral à viga.



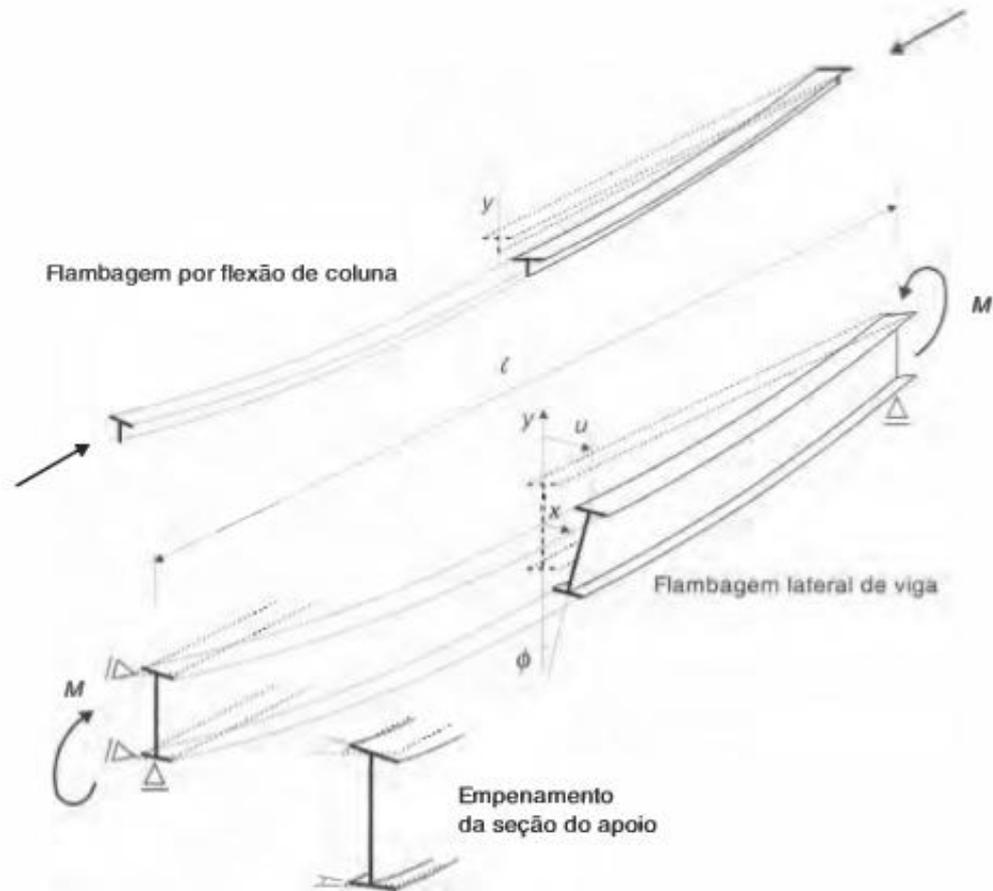


Fig. 6.12 Flambagem lateral de viga biapoiada.

Vigas de Alma Cheia



Os tipos de seções transversais mais adequados para o trabalho à flexão são aqueles com maior inércia no plano da flexão, ou seja, áreas mais afastadas do eixo neutro.

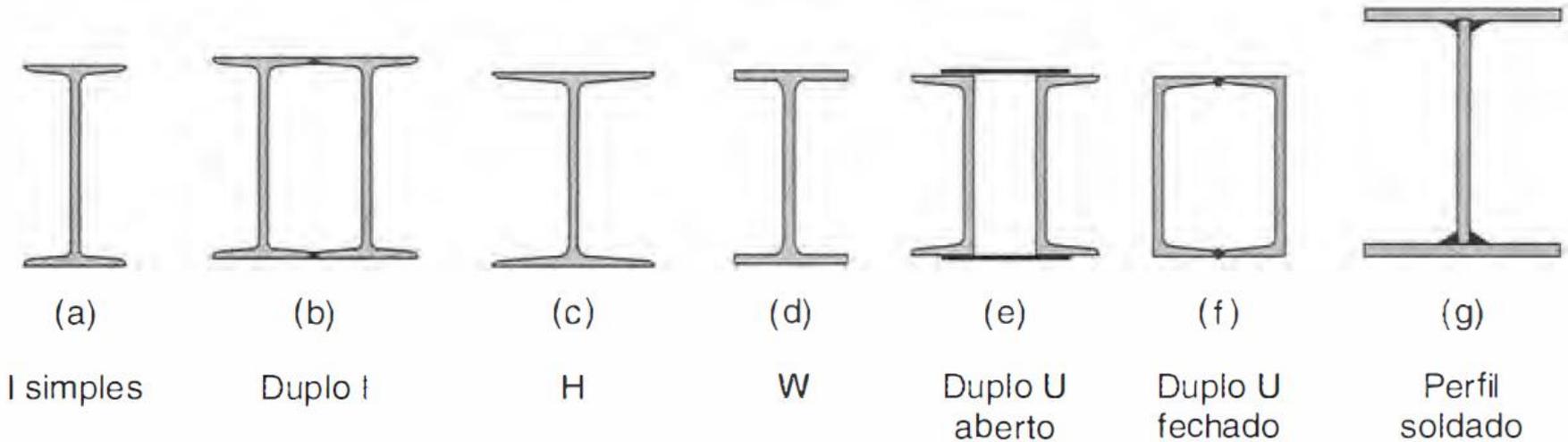
Ideal concentrar áreas em duas chapas, uma inferior e uma superior, ligando-as por uma chapa fina.

Formas de $I(i)$ são as mais funcionais, devendo, entretanto, seu emprego obedecer às limitações de flambagem.

As vigas com muita área próxima ao eixo neutro, como peças maciças de seção quadrada ou circular, trabalham com menor eficiência na flexão. Ou seja, para o mesmo peso da viga, têm menor capacidade de carga.

Vigas de Alma Cheia

Tipos construtivos usuais



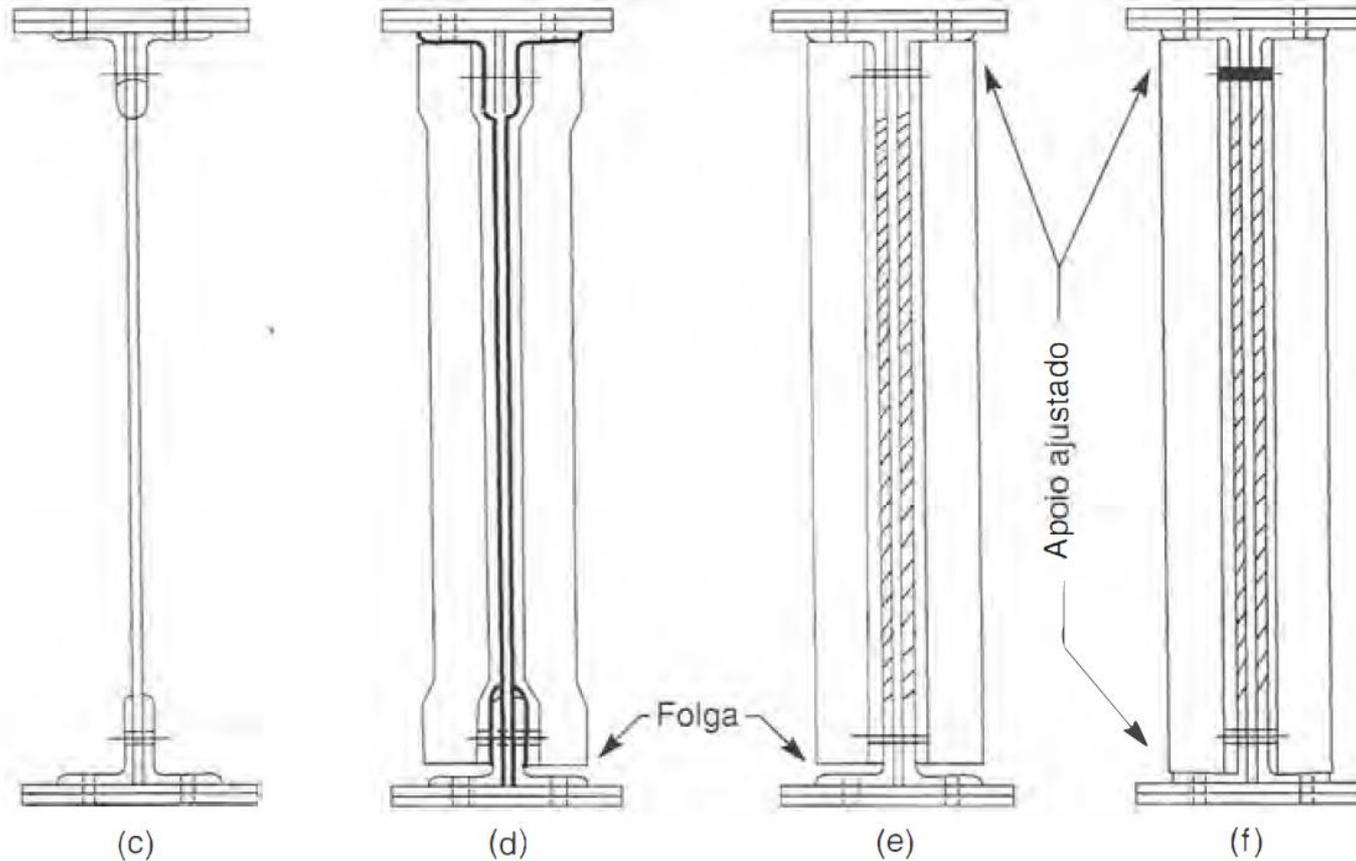
a, c e d: laminados

b, e e f: seções de vigas formadas por associação de perfis laminados simples.

g: perfil I formado por chapas soldadas.

Vigas de Alma Cheia

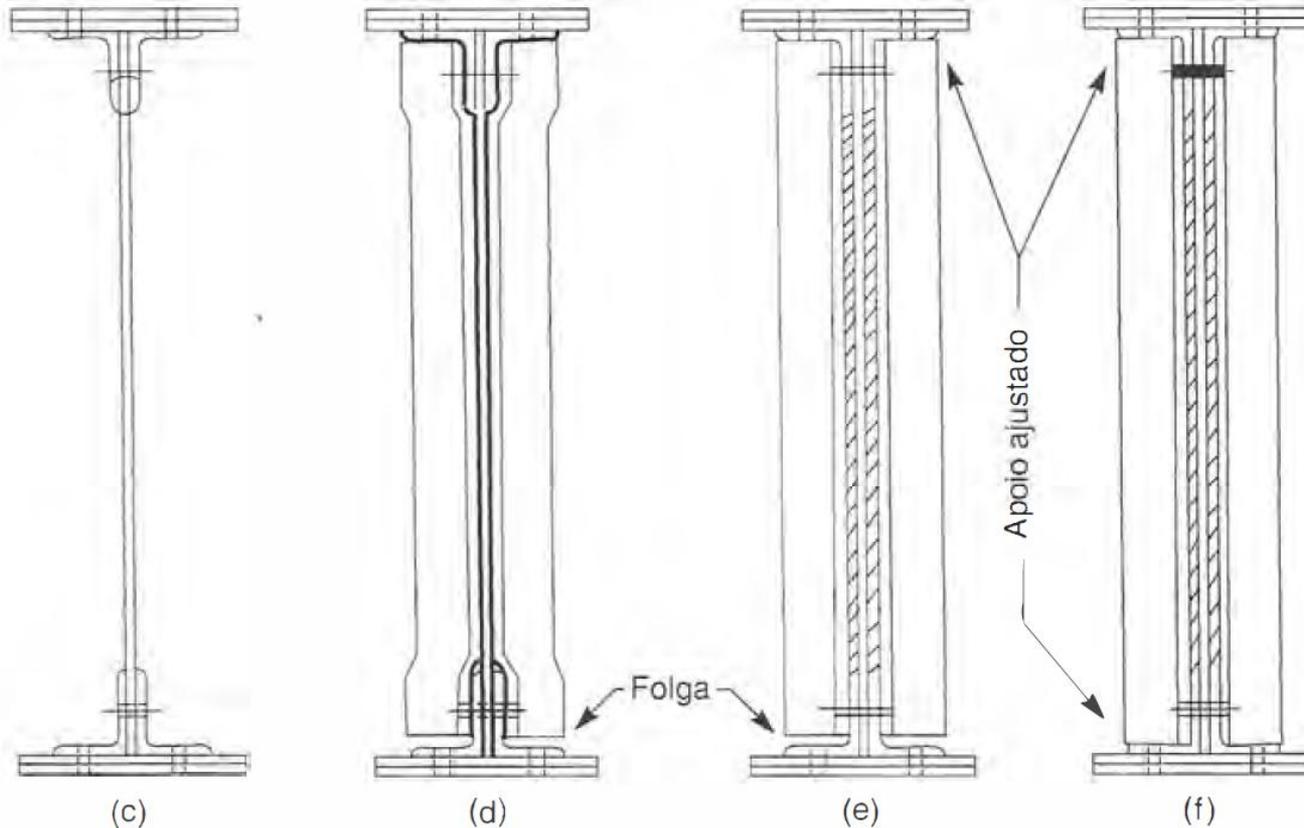
Tipos construtivos usuais



As vigas fabricadas, soldadas e de grandes dimensões têm o aspecto acima.

Vigas de Alma Cheia

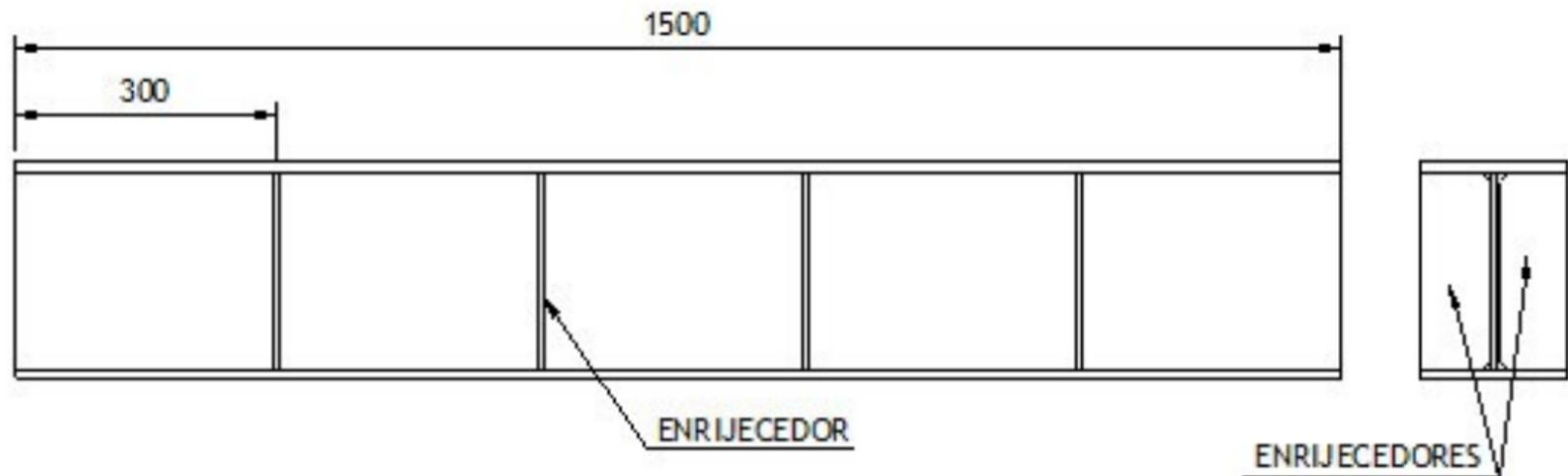
Tipos construtivos usuais



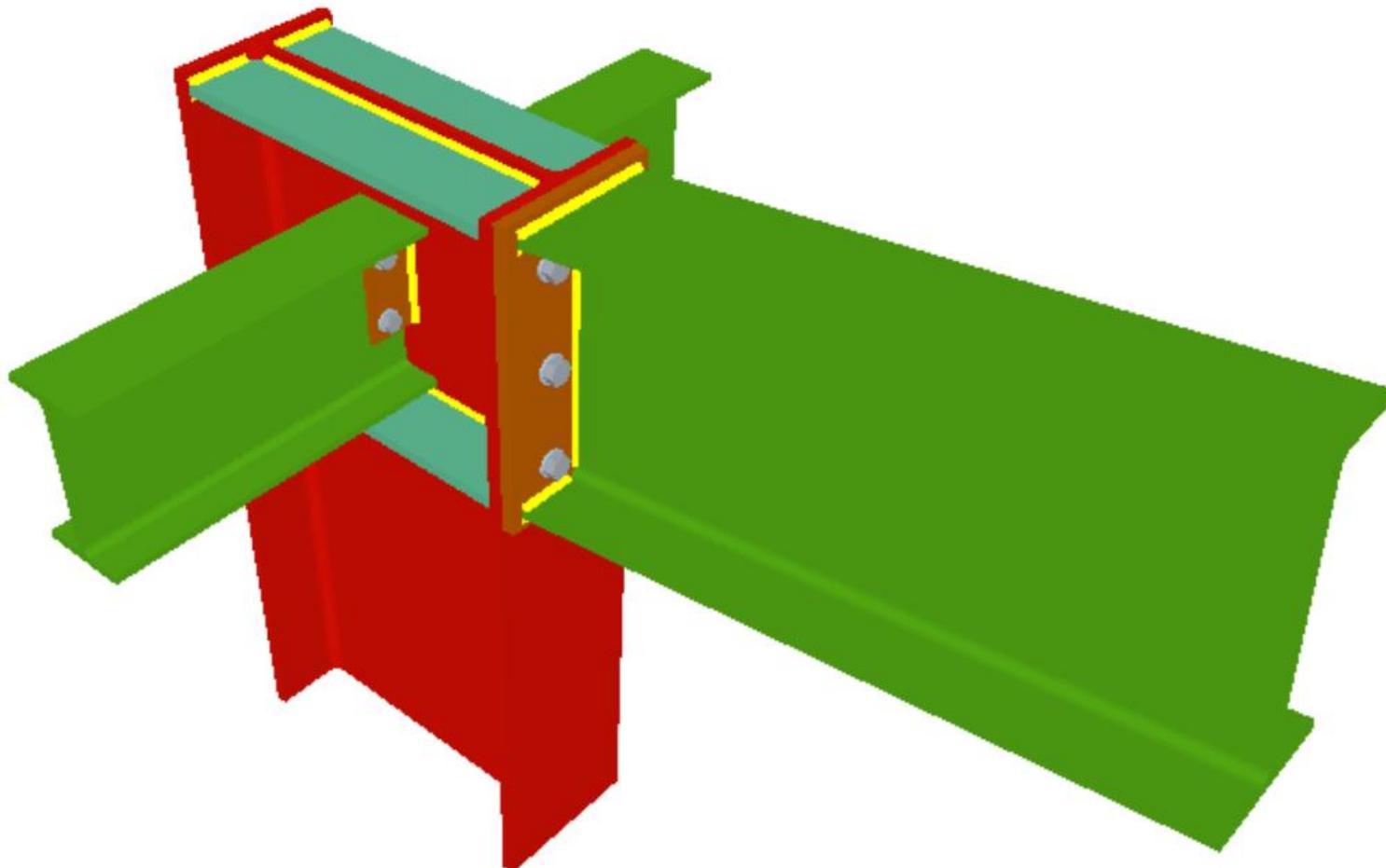
As mesas são formadas por chapas grossas podendo ter largura variável.

A alma é formada por chapas finas, em geral com enrijecedores, para evitar flambagem.

Vigas de Alma Cheia

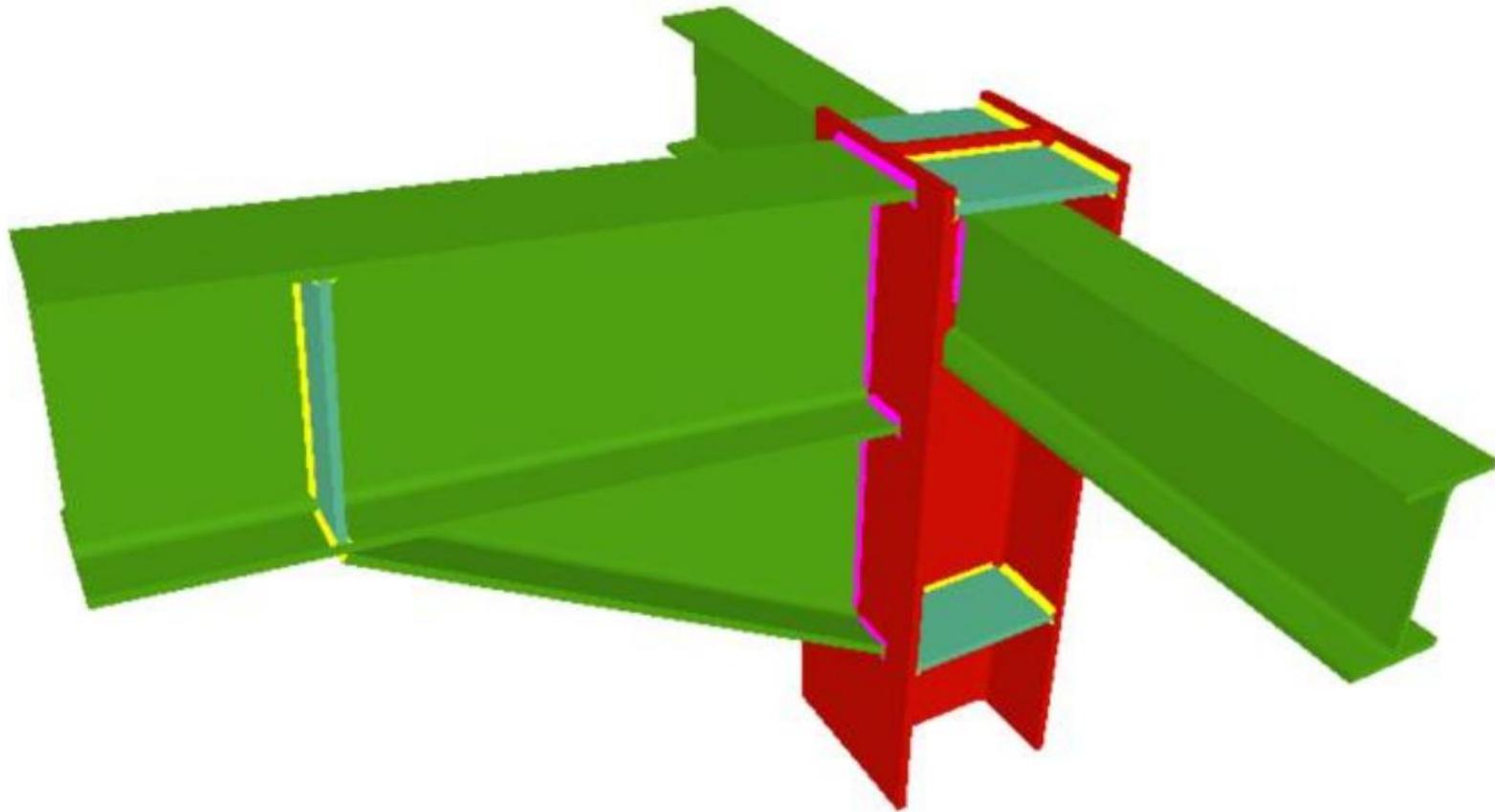


Vigas de Alma Cheia



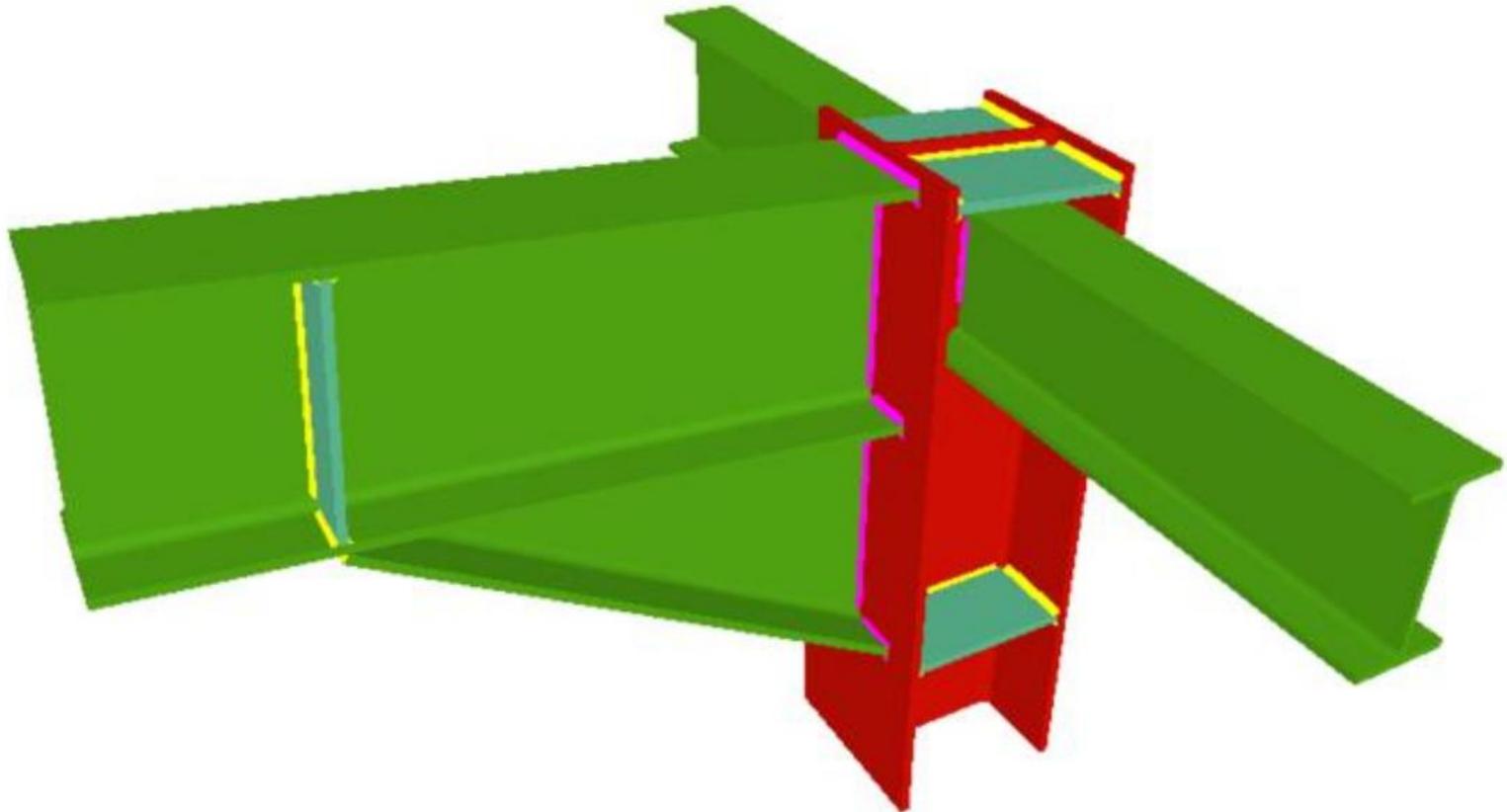
Enrijecedores transversais

Vigas de Alma Cheia



Enrijecedores transversais

Vigas de Alma Cheia



Enrijecedores transversais

Vigas de Alma Cheia



Enrijecedores transversais – aplicação em viga de rolamento para ponte rolante

Vigas de Alma Cheia

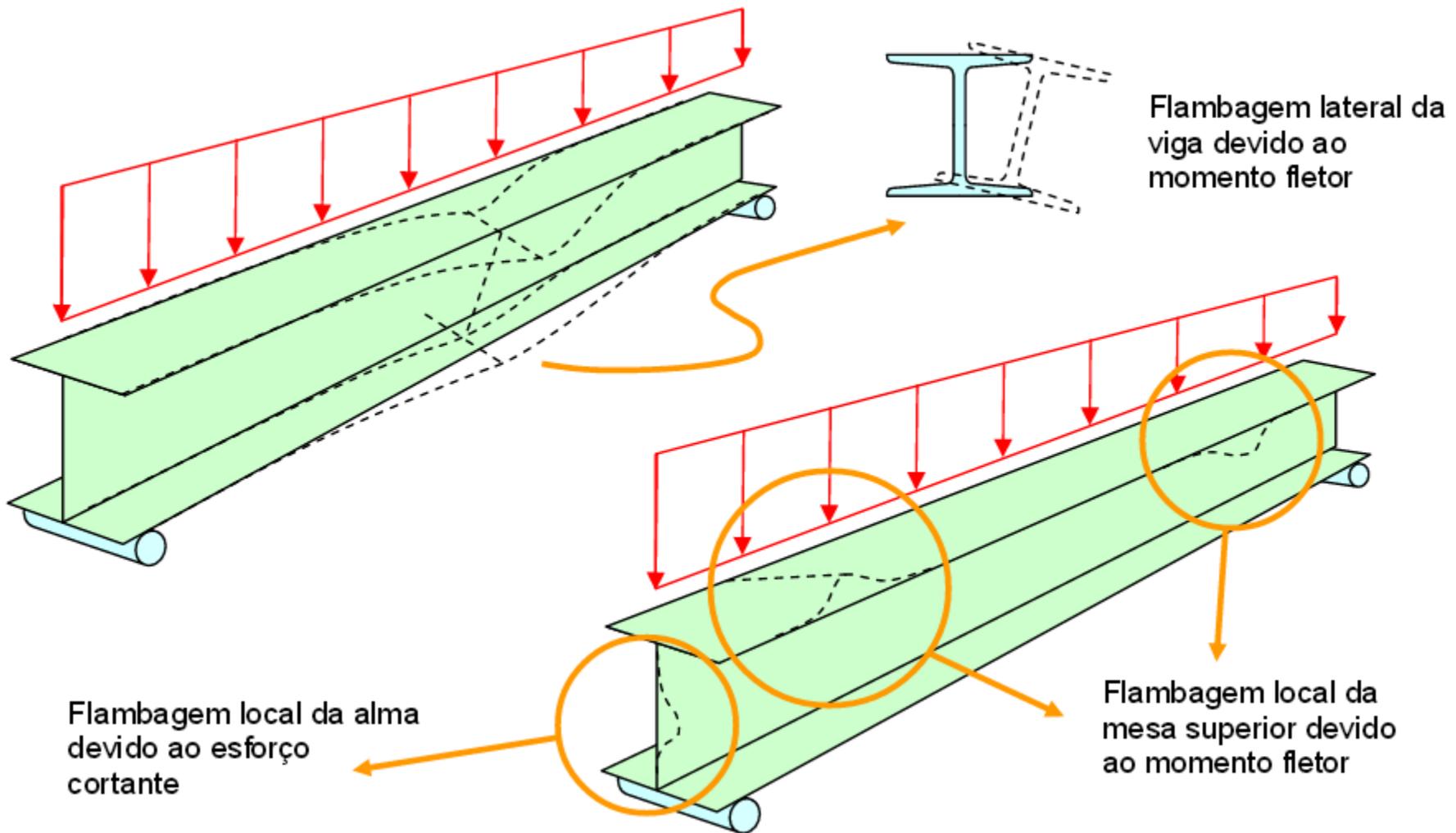


Enrijecedores transversais – aplicação em viga de rolamento para ponte rolante

Vigas de Alma Cheia



Enrijecedores transversais – aplicação em viga de rolamento para ponte rolante

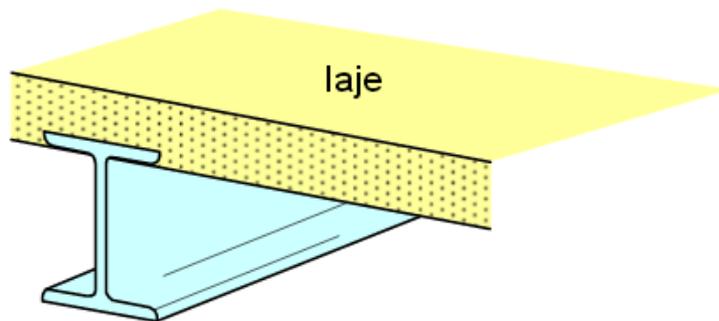


Vigas de Alma Cheia

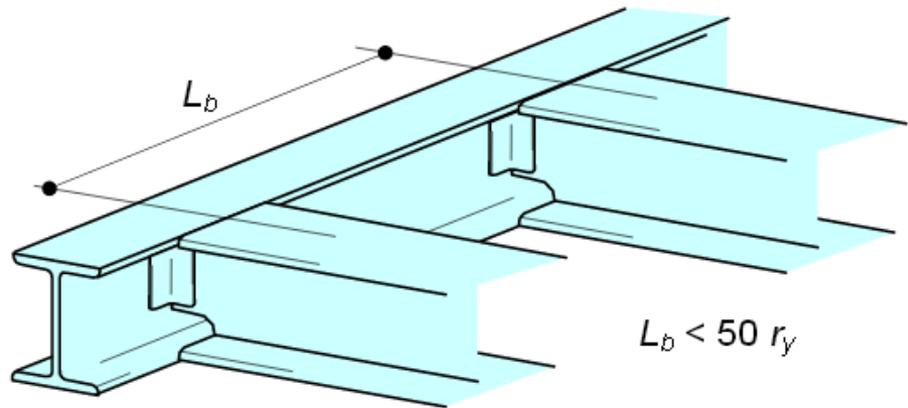
Pode-se evitar o fenômeno da flambagem através de contenções.

Para se evitar a flambagem lateral, pode-se realizar a contenção lateral do perfil, de modo que haja o impedimento de giros e translações laterais.

A contenção pode ser do tipo contínua ou discreta.



Contenção lateral contínua
da mesa superior



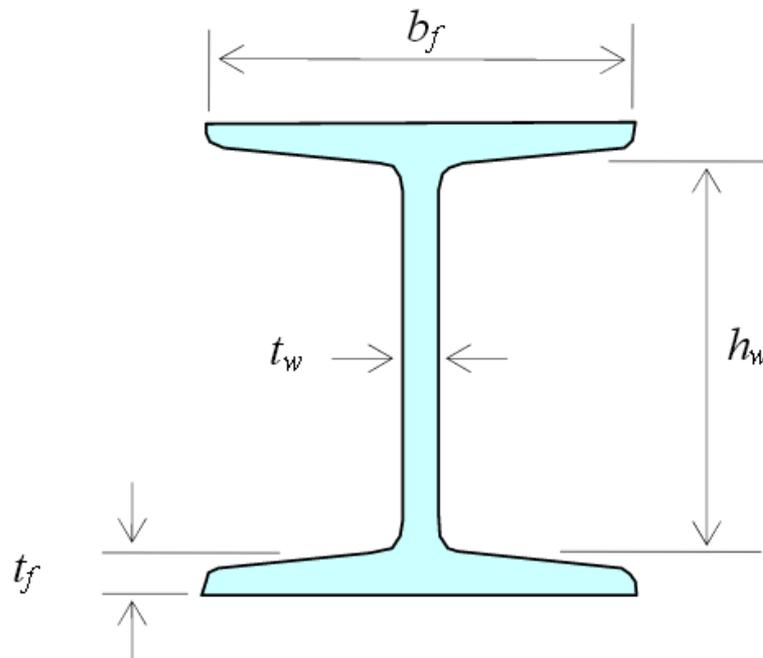
Contenção lateral discreta de uma viga

$$L_b < 50 r_y$$

Vigas de Alma Cheia

A contenção lateral discreta deve ser realizada ao longo da viga a ser contida por intermédio de, por exemplo, outras vigas, espaçadas regularmente de um espaçamento, L_b , sendo este não maior que 50 vezes o raio de giração da viga em questão, em relação ao seu eixo de menor inércia.

Em segundo lugar, para se evitar a flambagem local, deve-se trabalhar com perfis que tenham almas e mesas robustas o suficiente para que este fenômeno não ocorra, ou seja, as seguintes condições devem ser obedecidas: [Pacheco, A., Apostila]



Esbeltez das mesas:

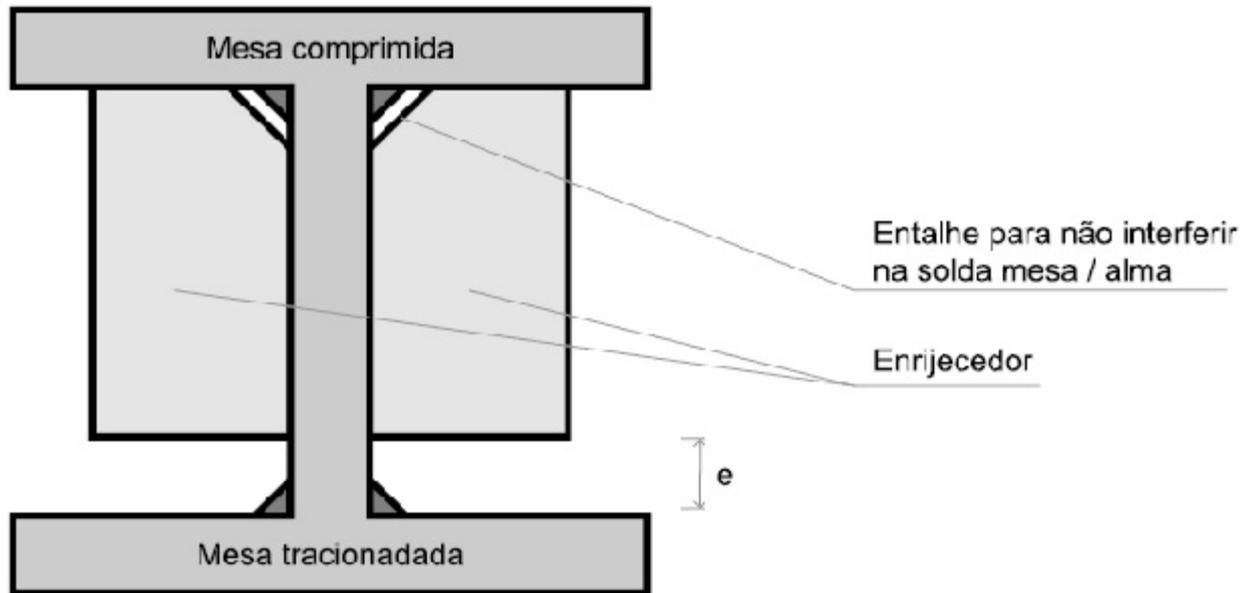
$$\lambda = 0,5 \frac{b_f}{t_f} \leq 11$$

Esbeltez da alma:

$$\lambda = \frac{h_w}{t_w} \leq 71$$

Vigas de Alma Cheia

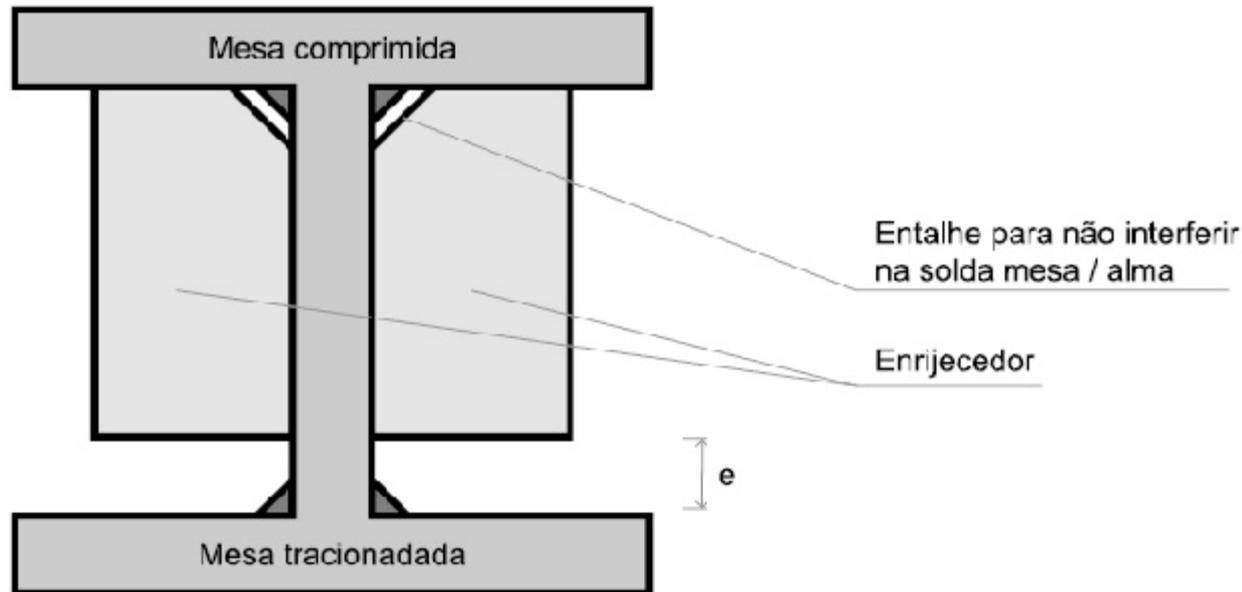
Tipos construtivos usuais



As vigas fabricadas, soldadas e de grandes dimensões

Vigas de Alma Cheia

Tipos construtivos usuais

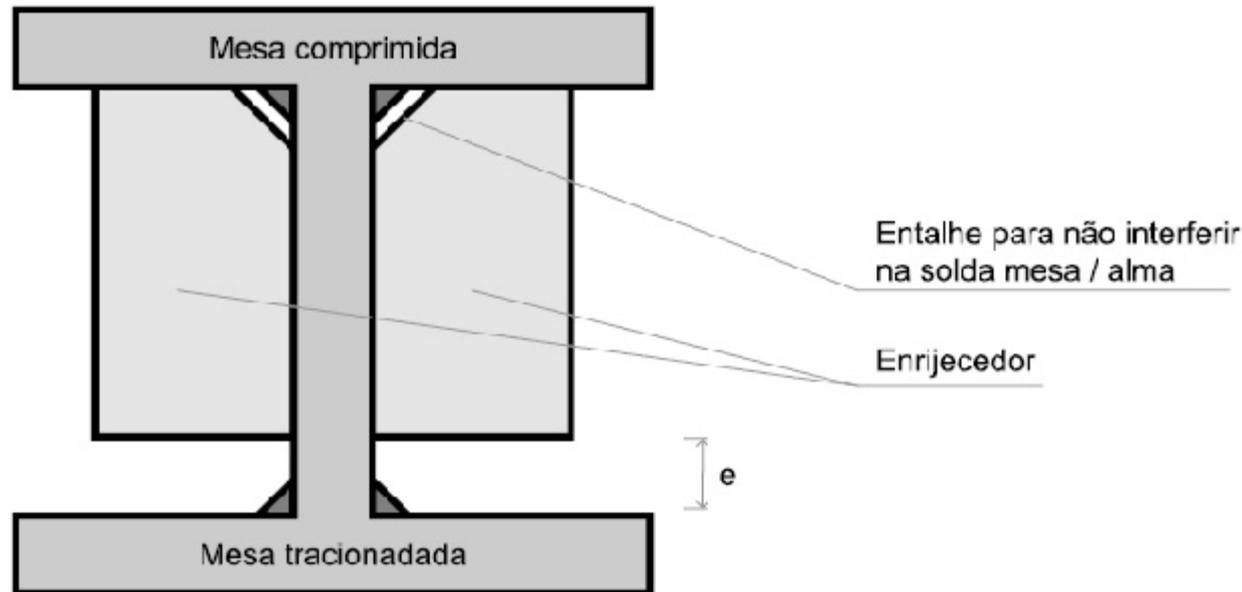


As mesas são formadas por chapas grossas, podendo ter largura variável.

A alma é formada por chapa fina, em geral com enrijecedores, para evitar flambagem.

Vigas de Alma Cheia

Tipos construtivos usuais



As mesas são formadas por chapas grossas, podendo ter largura variável.

A alma é formada por chapa fina, em geral com enrijecedores, para evitar flambagem.

Vigas de Alma Cheia

Vigas de Alma Senoidal



Economia de material de 10% a 30% se comparado aos perfis soldados de alma plana

Vigas de Alma Cheia

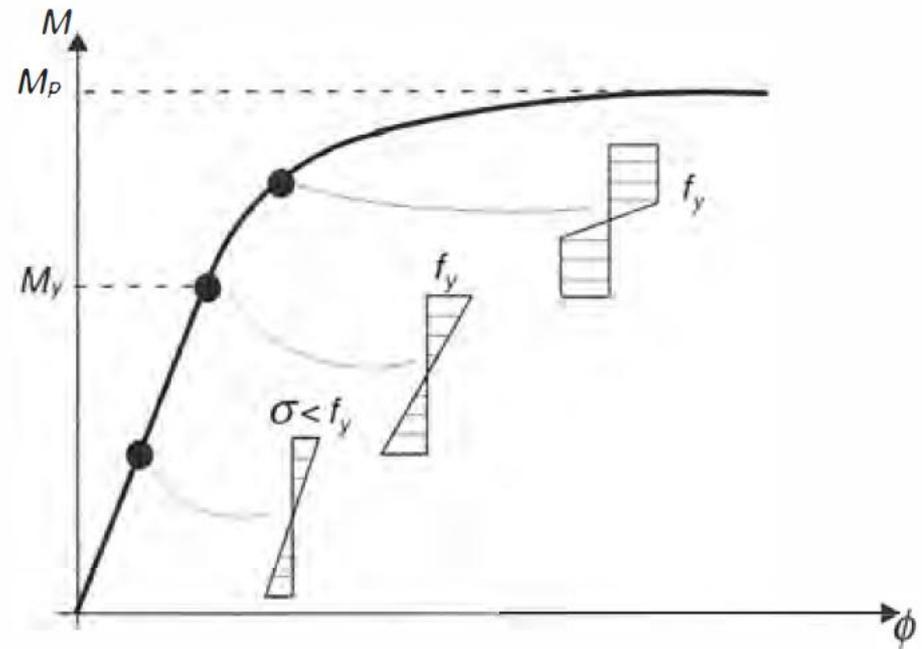
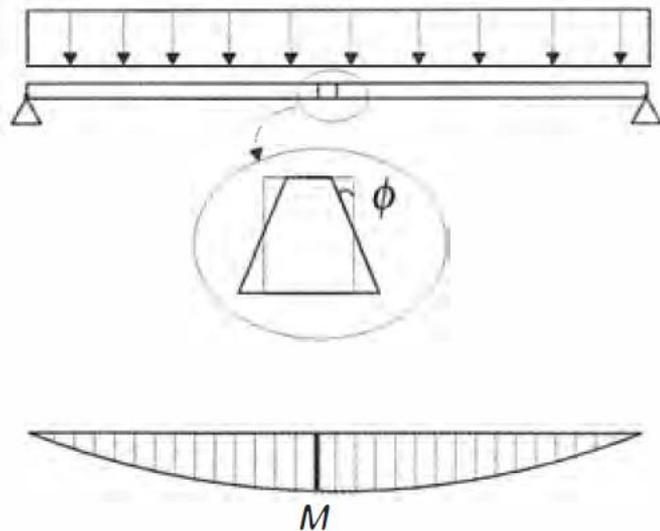


Goiânia, Shopping Estação

Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

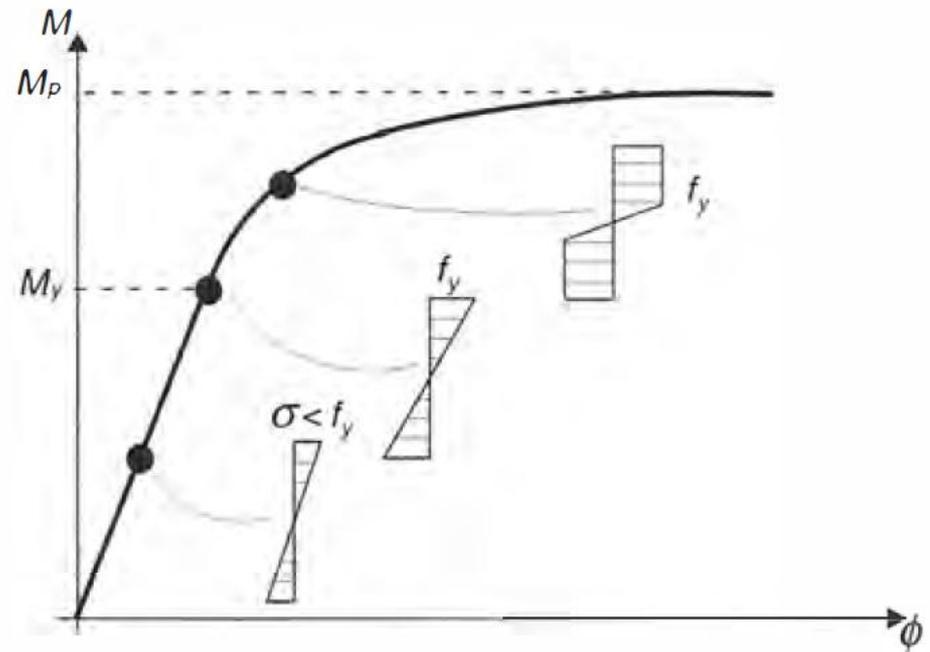
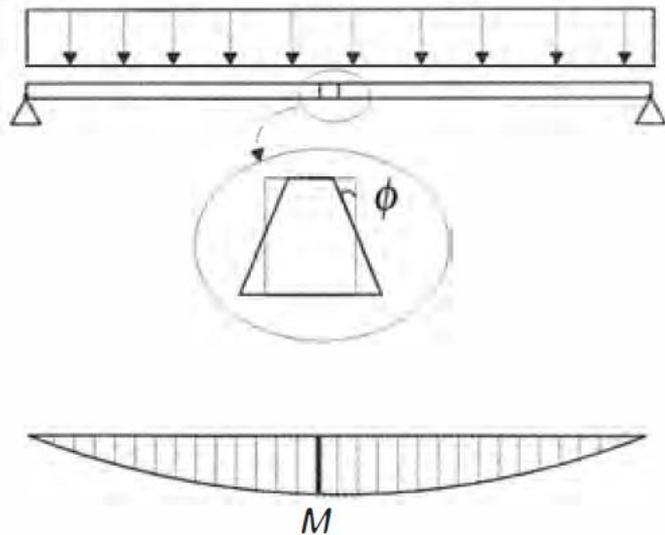
Comportamento de uma viga de aço biapoiada sob carga distribuída crescente. Relação momento x curvatura da seção mais solicitada.



Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

Comportamento de uma viga de aço biapoada sob carga distribuída crescente. Relação momento x curvatura da seção mais solicitada.



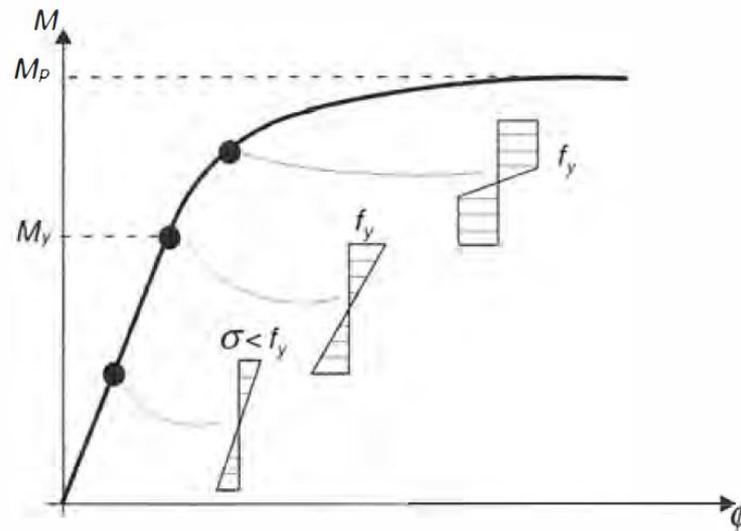
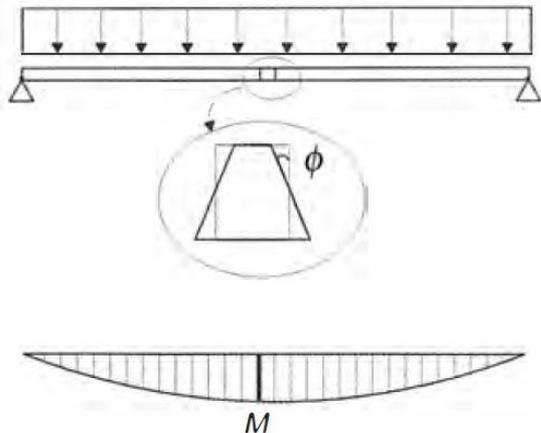
Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

O comportamento é linear, enquanto a máxima tensão é menor do que a tensão de escoamento do aço.;

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I} y_{\max} = \frac{M}{W} < f_y$$

$$W = \frac{I}{y_{\max}}$$



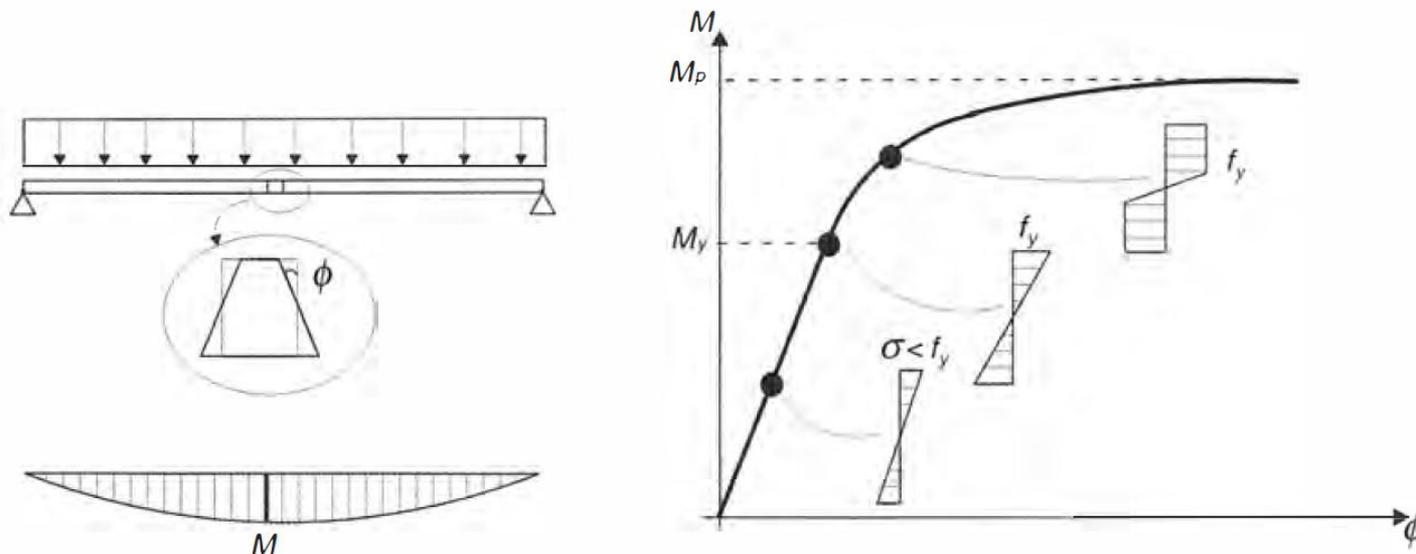
y_{\max} é a distância ao centróide do elemento de área mais afastado;
 I é o momento de inércia da seção em torno do eixo de flexão;
 W é o módulo elástico da seção.

Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

O momento M_y de início de plastificação da seção, não representa a capacidade resistente da viga, já que é possível continuar aumentando a carga após atingi-lo.

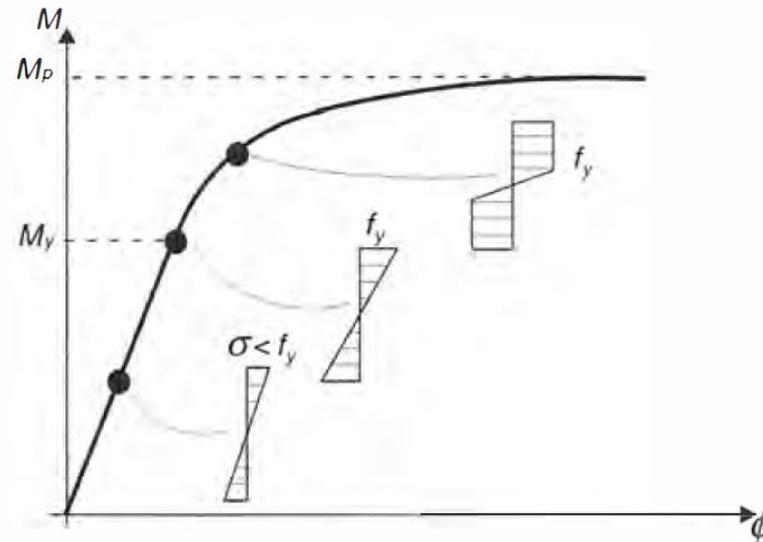
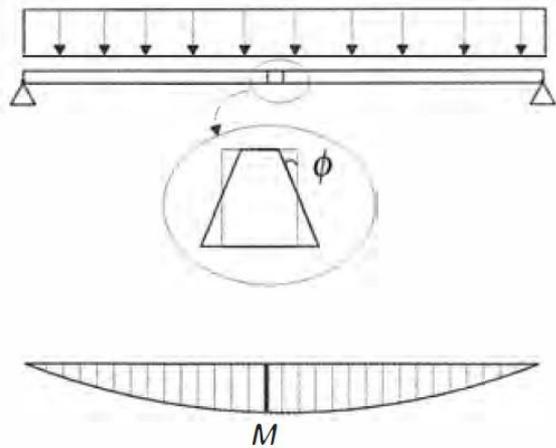
Entretanto, a partir de M_y o comportamento passa a ser não-linear, pois as fibras mais internas da seção vão também plastificando-se progressivamente até a plastificação total da seção.



Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

O momento resistente, igual ao momento de plastificação total da seção M_p , corresponde a grandes rotações desenvolvidas na viga.

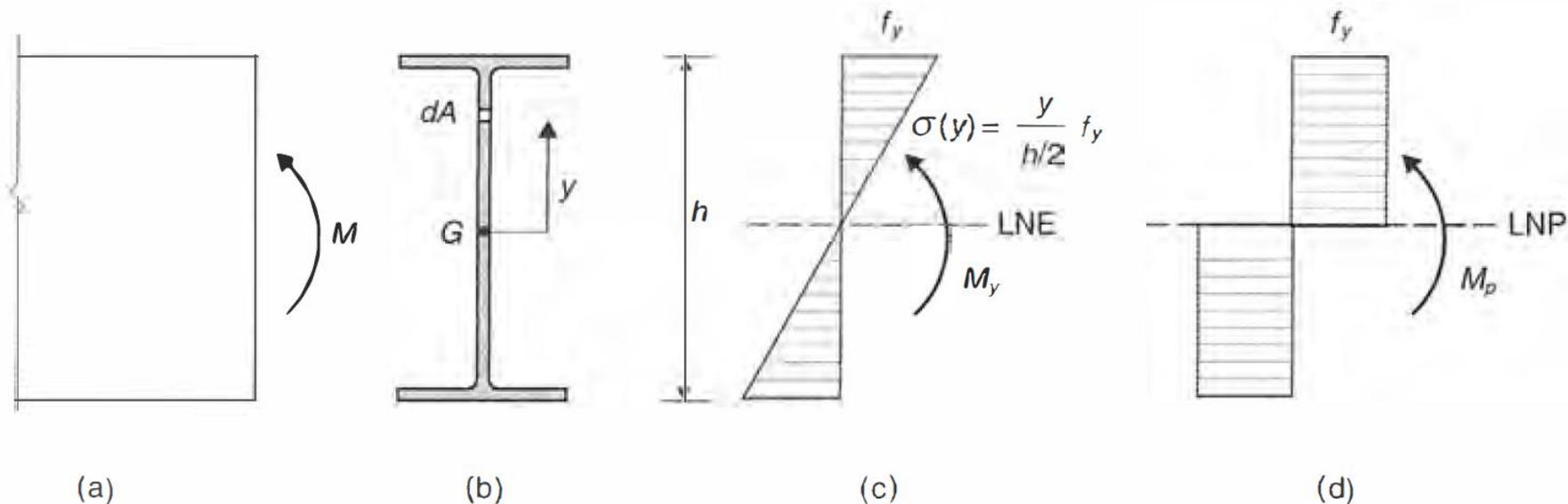


Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

Uma viga de seção duplamente simétrica sujeita à flexão pura é mostrada em (a) e (b).

O momento de início de plastificação M_y é o esforço resultante das tensões do diagrama (c).



Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

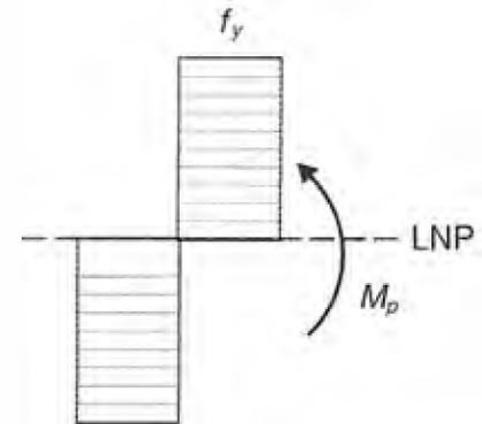
Na situação de plastificação total, o equilíbrio das forças horizontais define a posição da linha neutra plástica (LNP), como sendo o eixo que divide a seção em duas áreas iguais (tracionada e comprimida).

Com a equação de equilíbrio de momentos, tem-se:

$$\sum M = 0$$

$$M_p = \int y f_y dA = f_y Z$$

$$Z = A_t y_t + A_c y_c$$



(d)

Z é o módulo plástico da seção

Dimensionamento a Flexão

Momento de Início de Plastificação M_y e Momento de Plastificação Total M_p

A relação entre os momentos de plastificação total e incipiente denomina-se coeficiente de forma da seção:

$$\text{Coeficiente de forma} = \frac{M_p}{M_y} = \frac{Z}{W}$$

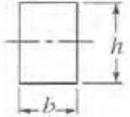
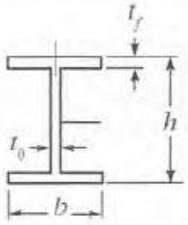
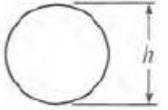
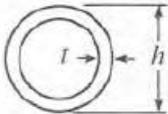
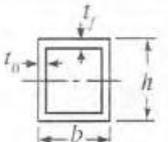
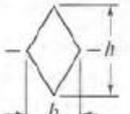
Onde:

$$M_y = \int y \sigma(y) dA = f_y W$$

$$W = \frac{I}{y_{\max}}$$

Tabela A12

**MÓDULO PLÁSTICO (Z) E COEFICIENTE DE FORMA (Z/W)
DE SEÇÕES DE VIGAS**

Seção	Módulo Plástico Z	Z/W
	$\frac{bh^2}{4}$	1,5
	$(x - x)$ $bt_f(h - t_f) + \frac{t_0}{4} (h - 2t_f)^2$	1,12 (aprox.)
	$(y - y)$ $\frac{b^2t_f}{2} + \frac{1}{4} (h - 2t_f)t_0^2$	1,55 (aprox.)
	$\frac{h^3}{6}$	1,70
	$\frac{h^3}{6} \left[1 - \left(1 - \frac{2t}{h} \right)^3 \right]$	$\frac{16}{3\pi} \left[\frac{1 - \left(1 - \frac{2t}{h} \right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2t}{h} \right)^4} \right]$
	$th^2 (t \ll h)$	
	$\frac{bh^2}{4} \left[1 - \left(1 - \frac{2t_0}{b} \right) \left(1 - \frac{2t_f}{h} \right)^2 \right]$	1,12 (aprox.)
	$\frac{bh^2}{12}$	2

Exemplo 6.2.1

Para o perfil soldado da figura, calcular o coeficiente de forma para flexão em torno do eixo $x - x$.

$$\text{Momento de inércia } I_x = 2(20 \times 0,95 \times 44,52^2) + 0,8 \times 88,1^3/12 = 120.903 \text{ cm}^4$$

$$\text{Módulo elástico } = W_x = 120.903/45,0 = 2686,7 \text{ cm}^3$$

$$\text{Módulo plástico } Z_x = 2(20 \times 0,95 \times 44,52) + 2(0,8 \times 44,05^2/2) = 3244 \text{ cm}^3$$

$$\text{Coeficiente de forma } Z_x/W_x = 1,21$$

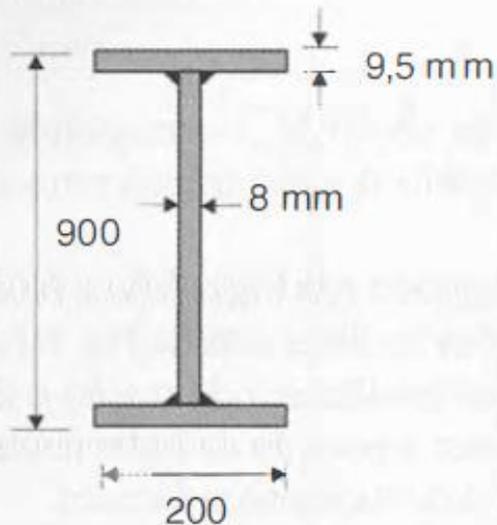


Fig. Ex. 6.2.1

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral



Classificação das Seções Quanto à Ocorrência de Flambagem Local

NBR 8800: as seções das vigas podem ser divididas em três classes conforme a influência da flambagem local sobre os respectivos momentos fletores resistentes.

Seção compacta: é aquela que atinge o momento de plastificação total ($M_{res} = M_p$) e exibe suficiente capacidade de rotação inelástica para configurar uma rótula plástica.

Seção semicompacta: ocorre a flambagem local após ter sido desenvolvida a plastificação parcial.

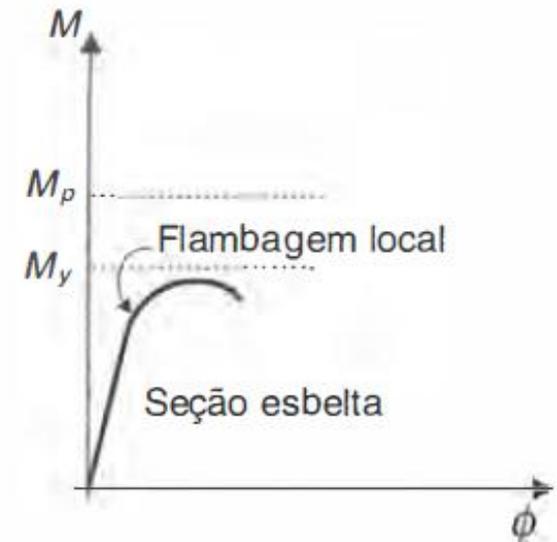
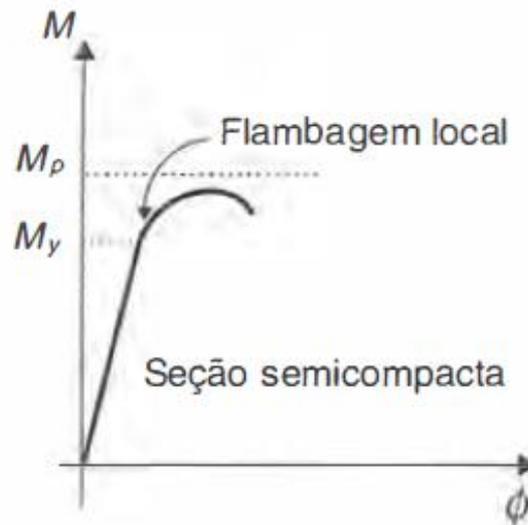
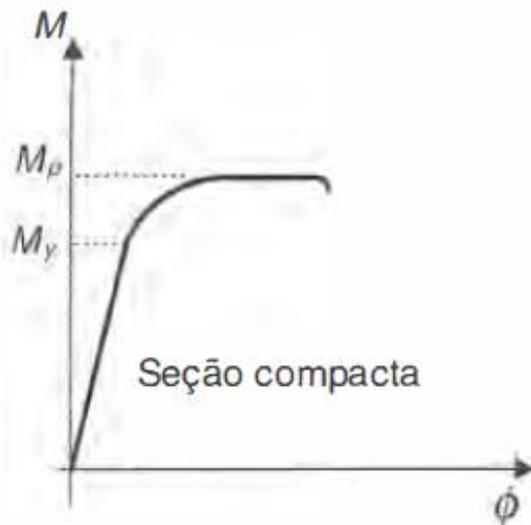
Seção esbelta: seção na qual a ocorrência da flambagem local impede que seja atingido o momento de início da plastificação. ($M_{res} < M_y$).

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Seção compacta: é aquela que atinge o momento de plastificação total ($M_{res} = M_p$) e exibe suficiente capacidade de rotação inelástica para configurar uma rótula plástica.

Seção semicompacta: ocorre a flambagem local após ter sido desenvolvida a plastificação parcial.

Seção esbelta: seção na qual a ocorrência da flambagem local impede que seja atingido o momento de início da plastificação. ($M_{res} < M_y$).



Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

As classe de seções são definidas por valores limites das relações largura-espessura das chapas componentes do perfil.

$$\lambda_b$$

$$\lambda_b \leq \lambda_p$$

Seção compacta (tabela 6.1)

$$\lambda_p < \lambda_b \leq \lambda_r$$

Seção Semicompacta

$$\lambda_r < \lambda_b$$

Seção Esbelta

Para perfis I fletidos no plano da alma, os limites seguinte.

$$\lambda_p \text{ e } \lambda_r$$

encontram-se na Tabela

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

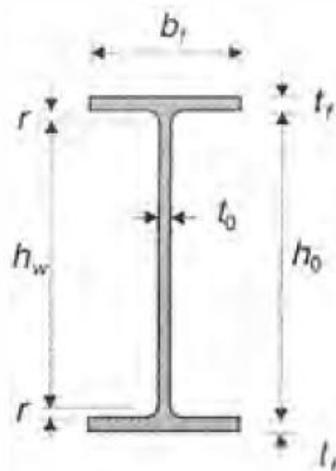
Tabela 6.1 Valores Limites da Relação Largura-Espessura de Seções I ou H, com Um ou Dois Eixos de Simetria, Fletidas no Plano da Alma (ver notação na Fig. 6.8)

		Valores Limites de λ_b	
Aço		λ_p	λ_r
Flambagem local da mesa $\lambda_b = \frac{1}{2} \frac{b_t}{t_f}$	Geral	$0,38 \sqrt{E/f_y}$	$C \sqrt{\frac{E}{0,7 f_y / k_c}}$
	MR250	10,7	28 (perfis laminados)
	AR350	9,1	24 (perfis laminados)
Flambagem local da alma $\lambda_b = h_w / t_0$	Geral	$D \sqrt{E/f_y} < \lambda_r$	$5,70 \sqrt{E/f_y}$
	MR250	106 (dupla simetria)	161
	AR350	90 (dupla simetria)	136

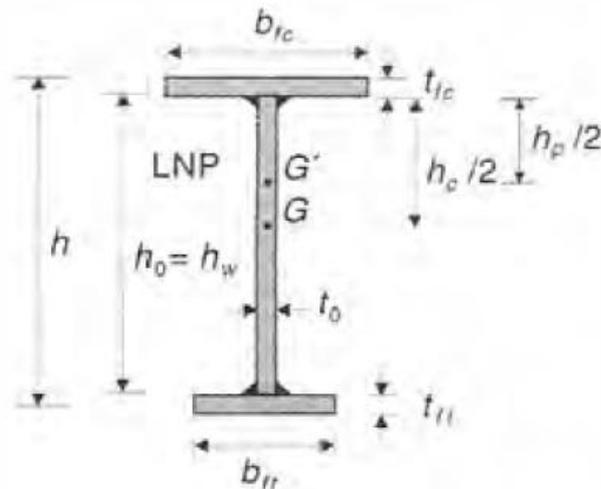
*Para perfis laminados: $C = 0,83$; $k_c = 1$; para perfis soldados: $C = 0,95$; $k_c = \frac{4}{\sqrt{h_0/t_0}}$ sendo $0,35 < k_c < 0,76$ (ver nota da Tabela 5.1)

**Para perfis com dupla simetria: $D = 3,76$; para perfis monossimétricos: $D = \frac{(h_c/h_p)}{(0,54 M_p/M_r - 0,09)^2}$

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral



(a)



(b)

Flambagem local da mesa

$$\lambda_b = \frac{1}{2} \frac{b_{fc}}{t_{fc}}$$

Flambagem local da alma

$$\lambda_b = \frac{h_w}{t_w}$$

G = centróide da seção

LNP = linha neutra plástica

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Exemplo 6.2.2

Verificar a classe dos perfis laminados em aço MR250 a seguir:

I 508(20") × 121,2; IPE 550; W 530. Usar as dimensões das Tabelas A6.2, A7.1 e A6.8, Anexo A.

Perfil	$\frac{1}{2} \frac{b_f}{t_f}$	$\frac{h_w}{t_0}$	Seção
I 508 × 121,2	3,8	$(508 - 2 \times 44 + 6,3)/15,2 = 28,0$	Compacta
IPE 550 × 106	6,1	$[550 - 2 (17,4 + 24)]/11,1 = 42,1$	Compacta
W 530 × 66,0	7,2	$[525 - 2 (11,4 + 12,1)]/8,9 = 53,7$	Compacta

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Exemplo 6.2.3

Verificar a classe dos perfis soldados a seguir:

CS250 × 52; CS 650 × 305; VS 400 × 49; VS 1400 × 260.

Usar as dimensões das Tabelas A8.1 e A8.3, Anexo A. Aço MR250.

Perfil	$\frac{1}{2} \frac{b_f}{t_f}$	$\frac{h_w}{t_0}$	Seção
CS 250 × 52	13	29	Semicompacta
CS 650 × 305	14,5	38	Semicompacta
VS 400 × 49	10,5	61	Compacta
VS 1400 × 260	15,6	109	Semicompacta

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

$$\lambda_b$$

Exemplo 6.2.3

Verificar a classe dos perfis soldados a seguir:

CS250 × 52; CS 650 × 305; VS 400 × 49; VS 1400 × 260.

Usar as dimensões das Tabelas A8.1 e A8.3, Anexo A. Aço MR250.

Perfil	$\frac{1}{2} \frac{b_f}{t_f}$	$\frac{h_w}{t_0}$	Seção
CS 250 × 52	13	29	Semicompacta
CS 650 × 305	14,5	38	Semicompacta
VS 400 × 49	10,5	61	Compacta
VS 1400 × 260	15,6	109	Semicompacta

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Momento Resistente de Projeto:

Calculado como:

$$M_{dres} = M_n / \gamma_{a1}$$

Tabela 1.7 Valores do Coeficiente γ_m Parcial de Segurança. Aplicado às Resistências (NBR 8800)

Material	γ_m	Combinações de Ações		
		Normais	Especiais ou de construção	Excepcionais
Aço estrutural, pinos e parafusos – Estados limites de escoamento e flambagem	γ_{a1}	1,10	1,10	1,00
Aço estrutural, pinos e parafusos – Estado limite de ruptura.	γ_{a2}	1,35	1,35	1,15
Concreto	γ_c	1,40	1,20	1,20
Aço de armadura de concreto armado	γ_s	1,15	1,15	1,00

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

onde:

$$M_n$$

Momento Resistente nominal, obtido por análise, sendo o valor determinado pelo limite de escoamento do aço, ou por flambagem.

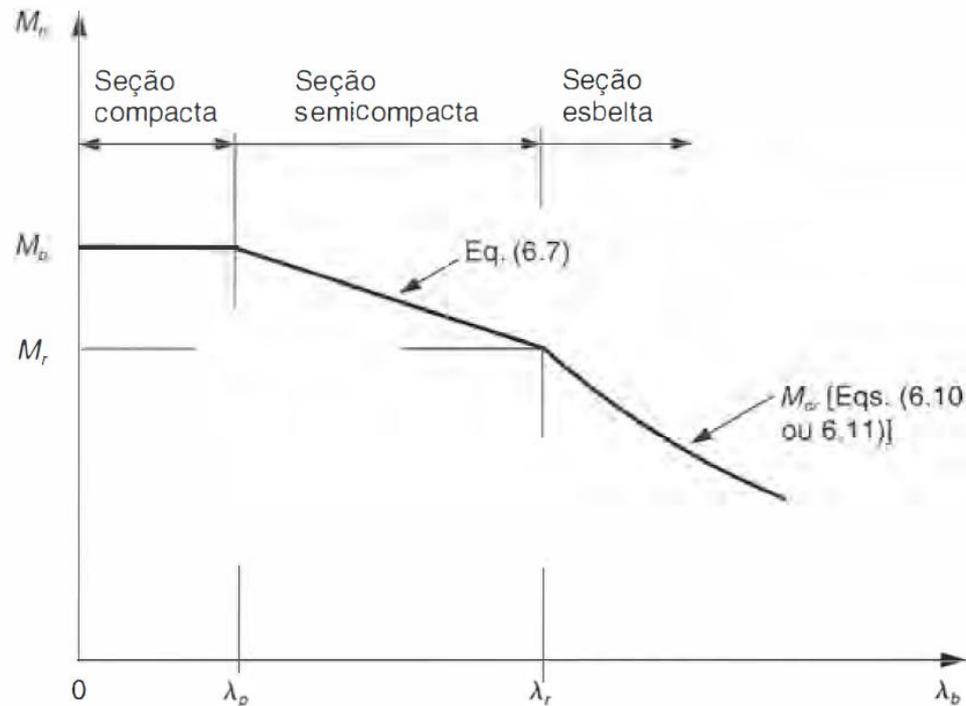


Fig. 6.9 Variação do momento resistente nominal de vigas I ou H, carregadas no plano da alma, com efeito de flambagem local da mesa ou da alma (admite-se contenção lateral que elimina a flambagem lateral). O parâmetro λ_b é definido na Fig. 6.8.

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

onde:

Momento Resistente nominal, obtido por análise, sendo o valor determinado pelo limite de escoamento do aço, ou por flambagem.

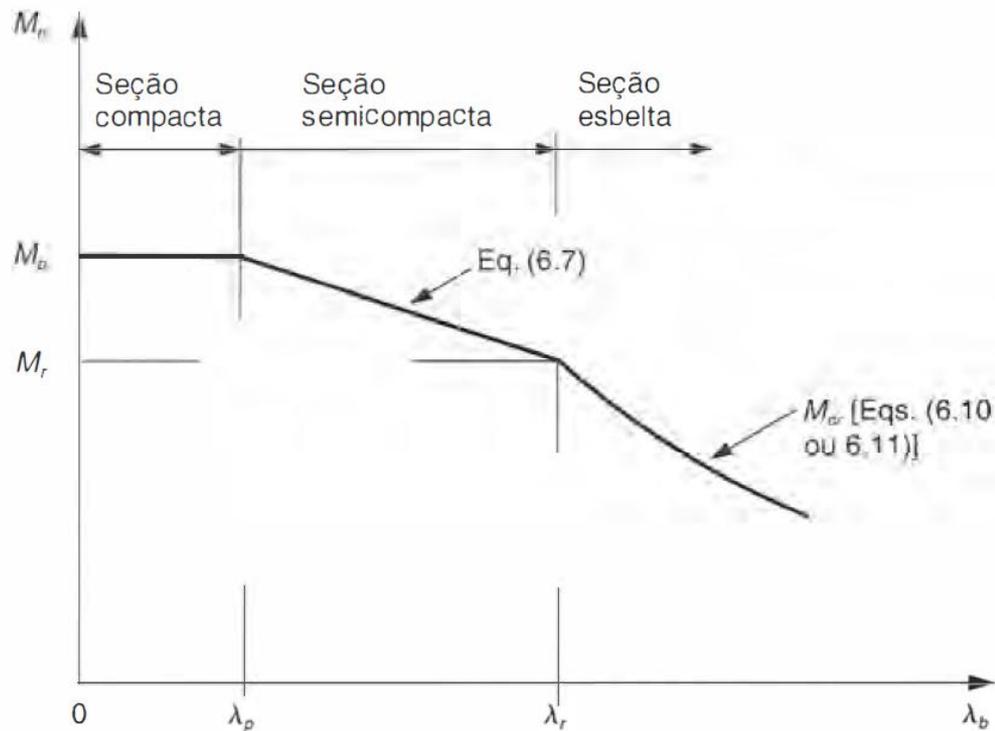


Fig. 6.9 Variação do momento resistente nominal de vigas I ou H, carregadas no plano da alma, com efeito de flambagem local da mesa ou da alma (admite-se contenção lateral que elimina a flambagem lateral). O parâmetro λ_b é definido na Fig. 6.8.

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

onde:

Momento Resistente nominal, obtido por análise, sendo o valor determinado pelo limite de escoamento do aço, ou por flambagem.

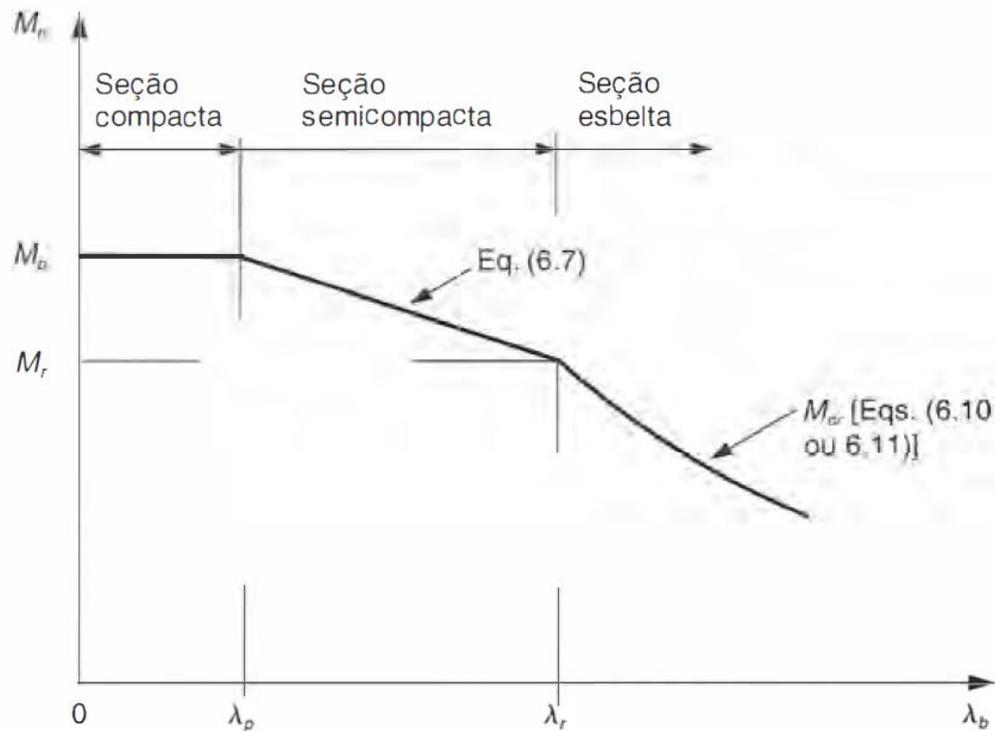


Fig. 6.9 Variação do momento resistente nominal de vigas I ou H, carregadas no plano da alma, com efeito de flambagem local da mesa ou da alma (admite-se contenção lateral que elimina a flambagem lateral). O parâmetro λ_b é definido na Fig. 6.8.

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Flambagem local da mesa

$$M_r = W_c (f_y - \sigma_r) < W_t f_y$$

σ_r Tensão residual de compressão nas mesas tomada como

$$0,3 f_y$$

W_c, W_t Módulos elásticos da seção referidos às fibras mais comprimida e mais tracionada, respectivamente.

Flambagem local da alma

$$M_r = W f_y$$

W Menor módulo resistente elástico da seção.

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Nas seções semicompactas, os momentos nominais podem ser interpolados linearmente entre os valores limites M_r e M_p :

$$M_n = M_p - \frac{\lambda_b - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} (M_p - M_r)$$

Limitação do Momento Resistente

Para comportamento elástico:

$$M_{dres} < 1,50W f_y / \gamma_{a1}$$

Sendo W o menor módulo elástico da seção.

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Exemplo 6.2.4

Calcular o momento resistente de projeto de um perfil W 530 × 66,0 em aço MR250, com contenção lateral contínua.

O perfil é compacto como se viu no Exemplo 6.2.2.

$$M_{d\text{ res}} = Z f_y / \gamma_{al} = 1558 \times 25 / 1,10 = 35.409 \text{ kNcm} = 354,1 \text{ kNm}$$

Exemplo 6.2.5

Calcular o momento resistente de projeto de um perfil soldado VS 400 × 49, com contenção lateral contínua.

O perfil dado é compacto, como se viu no Exemplo 6.2.3. Com as dimensões da Tabela A.8.3 tem-se.

$$Z = 2 \times 20 \times 0,95 + 2 \times 19,05 \times 0,63 \times 9,53 = 970 \text{ cm}^3$$

$$M_{d\text{ res}} = Z f_y / \gamma_{al} = 970 \times 25 / 1,10 = 22.045 \text{ kNcm} = 220,45 \text{ kNm}$$

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Momento Resistente de Cálculo de Vigas I com Mesa Esbelta

Nas vigas I contidas lateralmente com alma atendendo ao limite para seção semicompacta, porém com mesas esbeltas, o momento resistente pode ser calculado com a tensão resistente na mesa reduzida pelo valor Q_s de flambagem local elástica de placa não enrijecidas (seção 5.6).

$$M_n = Q_s f_y W_c$$

Por exemplo, para mesas de perfis laminados, tem-se (tabela 5.2):

$$Q_s = \frac{0,69E}{f_y \lambda_b^2}$$

Com:

$$\lambda_b = \frac{b_f}{2t_f}$$

Tabela 5.2 Expressões do fator Q_s aplicáveis a placas não enrijecidas (tipo AL)

Grupo (ver Tabela 5.1)	Limites			$Q_s \leq 1$
		MR250	AR350	
3	$0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$12,7 < \frac{b}{t} \leq 25,7$	$10,7 < \frac{b}{t} \leq 21,7$	$Q_s = 1,340 - 0,76 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
	$\frac{b}{t} > 0,91 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$\frac{b}{t} > 25,7$	$\frac{b}{t} > 21,7$	$Q_s = \frac{0,53E}{f_y (b/t)^2}$
4	$0,56 \sqrt{\frac{E}{f}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$15,8 < \frac{b}{t} \leq 29,1$	$13,4 < \frac{b}{t} \leq 24,6$	$Q_s = 1,415 - 0,74 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
	$\frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$\frac{b}{t} > 29,1$	$\frac{b}{t} > 24,6$	$Q_s = \frac{0,69E}{f_y (b/t)^2}$
5	$0,64 \sqrt{\frac{E}{f_y / k_c}} < \frac{b}{t} \leq 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y / k_c}} *$			$Q_s = 1,415 - 0,65 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}$
	$\frac{b}{t} > 1,17 \sqrt{\frac{E}{f_y / k_c}} *$			$Q_s = \frac{0,90 E k_c}{f_y (b/t)^2} *$
6	$0,75 \sqrt{\frac{E}{f}} < \frac{b}{t} \leq 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$21,2 < \frac{b}{t} \leq 29,1$	$17,9 < \frac{b}{t} \leq 24,6$	$Q_s = 1,908 - 1,22 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{E}}$
	$\frac{b}{t} > 1,03 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$\frac{b}{t} > 29,1$	$\frac{b}{t} > 24,6$	$Q_s = \frac{0,69 E}{f_y \left(\frac{b}{t}\right)^2}$

$$* k_c = \frac{4}{\sqrt{h_0/t_n}} \quad 0,35 \leq k_c \leq 0,76$$

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Momento Resistente de Cálculo de Vigas I com Mesa Esbelta

De acordo com a NBR 8800, utiliza-se:

- Perfis laminados:

$$M_n = \frac{0,69E}{\lambda_b^2} W_c$$

- Perfis soldados:

$$M_n = \frac{0,90Ek_c}{\lambda_b^2} W_c$$

onde:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h_0/t_0}}$$

e:

$$0,35 \leq k_c \leq 0,763$$

Resistência à flexão de Vigas com Contenção Lateral

Momento Resistente de Cálculo de Vigas I com Mesa Esbelta

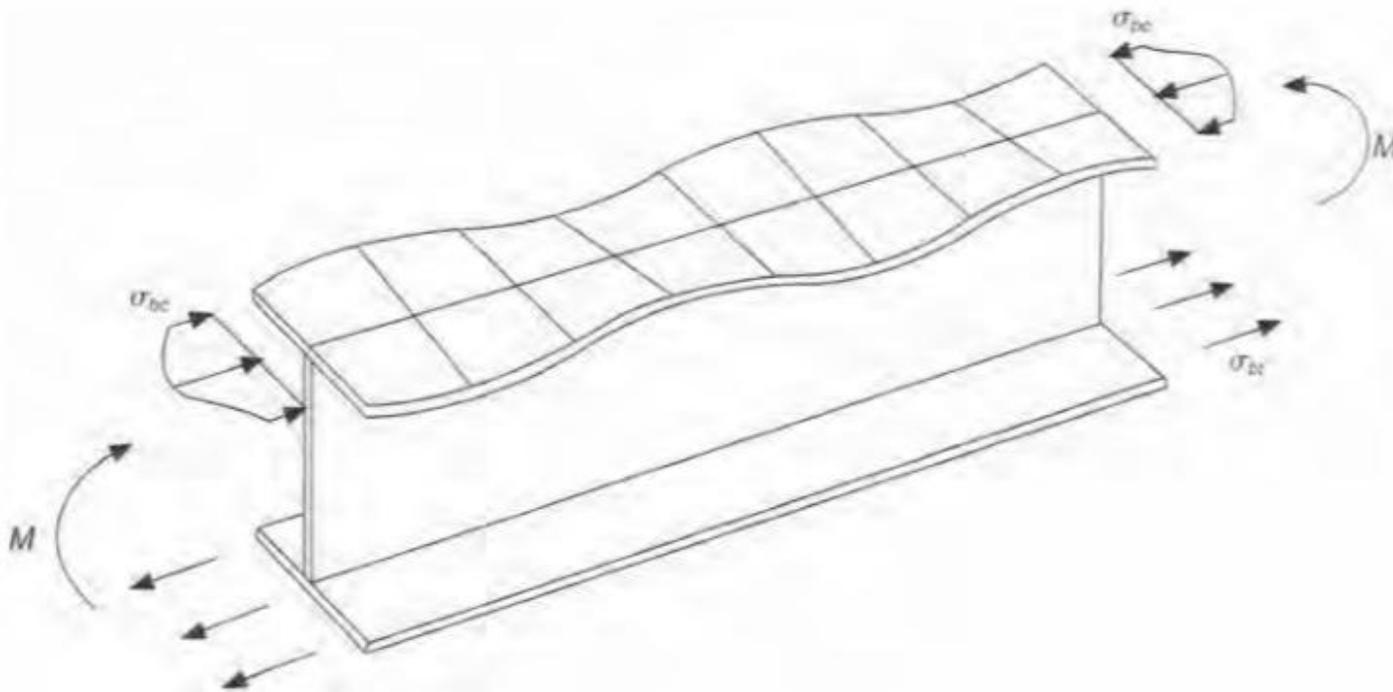


Fig. 6.10 Flambagem local da mesa comprimida em vigas I fletidas no plano da alma. As tensões normais de compressão da mesa (σ_{bc}) variam entre um valor máximo sobre a alma e um valor mínimo na borda (ver também Figs. 5.10a e 5.10b).

Momento Resistente de Cálculo de Vigas I com Alma Esbelta

Nas vigas I com alma esbelta, onde:

$$\frac{h_0}{t_0} > 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\frac{h_0}{t_0} < \left(\frac{h_0}{t_0} \right)_{\max}$$

O momento resistente de projeto pode ser calculado como:

$$\frac{M_n}{\gamma_{a1}}$$

Onde M_n é o menor dos valores:

$$M_n = W_t f_y$$

$$M_n = W_c k f_y$$

$$k = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300 a_r} \left(\frac{h_c}{t_0} - 5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right)$$

a_r a razão entre as áreas da alma e da mesa comprimida.

h_c o dobro da distância entre o centro geométrico da seção e a face interna da mesa comprimida.

Momento Resistente de Cálculo de Vigas com Alma e Mesa Esbeltas

Anexo H da norma NBR 8800

Resistência à flexão de vigas sem contenção lateral contínua. Flambagem lateral.

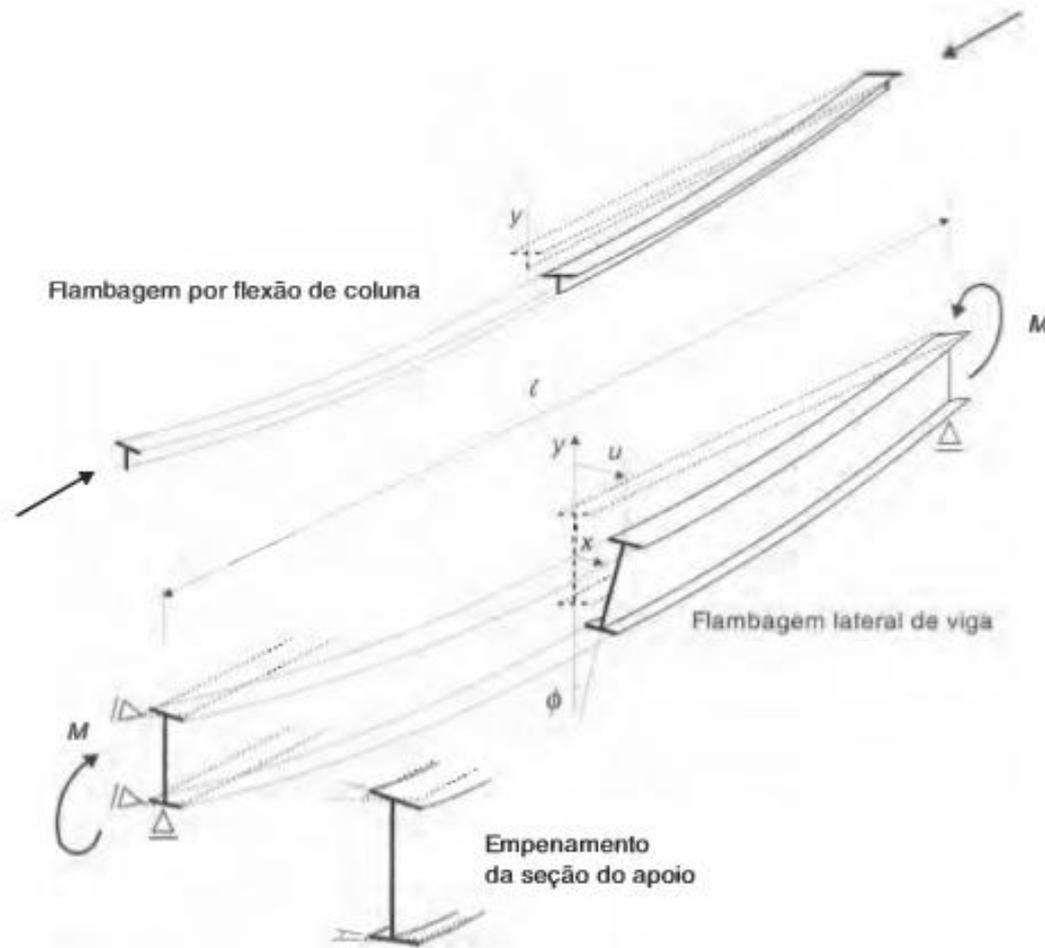


Fig. 6.12 Flambagem lateral de viga biapoiada.

Resistência à flexão de vigas sem contenção lateral contínua. Flambagem lateral.

Sob efeito de torção as seções sofrem rotações acompanhadas de deformações longitudinais, causando o empenamento.

São de grande importância as disposições construtivas de contenção lateral.

- Embebimento da mesa comprimida em laje de concreto ou ligação mesa-laje por meio de conectores.
- Apoios laterais discretos formados por quadros transversais, treliças de contraventamento etc, com rigidez suficiente.

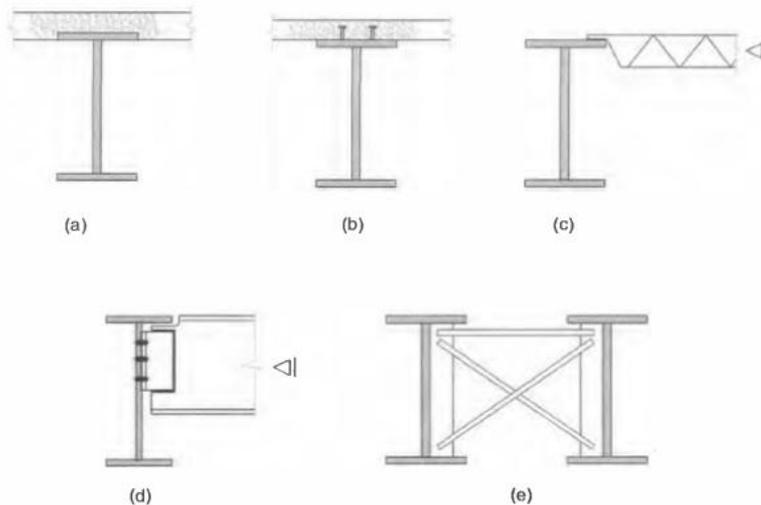


Fig. 6.13 Esquemas de contenção lateral de vigas.

Flambagem lateral de Viga Biapoiada com Momento Fletor Constante

O caso fundamental de análise de flambagem lateral elástica (figura).

Viga I duplamente simétrica, biaapoiada com contenção lateral e torcional nos extremos. e sujeita a um momento fletor constante no plano da alma (em torno de x).

Solução exata (Timoshenko e Gere)

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_y GJ + \frac{\pi^2}{l^2} EI_y EC_w}$$

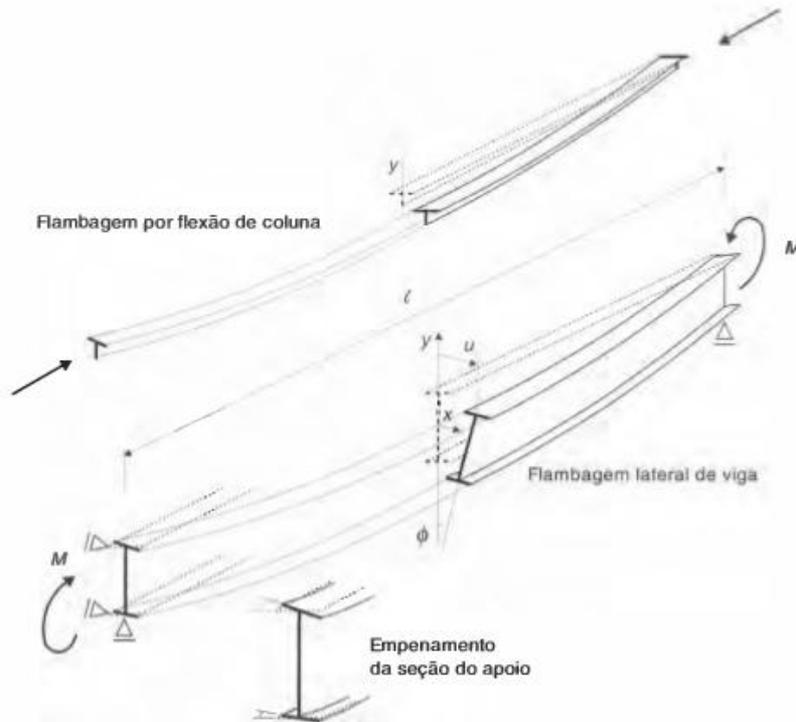


Fig. 6.12 Flambagem lateral de viga biapoiada.

Flambagem lateral de Viga Biapoiada com Momento Fletor Constante

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_y GJ + \frac{\pi^2}{l^2} EI_y EC_w}$$

L = comprimento da viga;

I_y = momento de inércia da seção transversal em torno do eixo y;

J = constante de torção pura;

C_w = constante de empenamento;

G = módulo de deformação transversal ou cisalhamento.

Para um perfil I ou H duplamente simétrico, as constantes J e C_w são expressas por:

$$J = \frac{1}{3} (2b_f t_f^3 + h_0 t_0^3)$$

$$C_w = \frac{1}{3} (h - t_f^2) \frac{I_y}{4}$$

Flambagem lateral de Viga Biapoiada com Momento Fletor Constante

Compõem a resistência à flambagem lateral.

EI_y : rigidez à flexão lateral;

GJ e EC_w : rigidez à torção.

Resistência à flexão de vigas I com dois eixos de simetria, fletidas no plano da alma.

De acordo com a norma NBR 8800, a resistência à flexão de vigas I duplamente simétricas fletidas no plano da alma é dada por:

$$\frac{M_n}{\gamma_{a1}}$$

O momento resistente nominal depende do comprimento l_b entre dois pontos de contenção lateral.

Apresenta-se a seguir os limites de cada categoria e as expressões do momento nominal.

Resistência à flexão de vigas I com dois eixos de simetria, fletidas no plano da alma.

a) Viga curta: $M_n = M_p = Zf_y$

$$l_b \leq l_{bp} = 1,76i_y \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

i_y = raio de giração em torno do eixo de menor inércia.

b) Viga longa:

$$M_n = M_{cr} = C_b \frac{\pi^2 EI_y}{l_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J_b^2}{C_w} \right)}$$

Resistência à flexão de vigas I com dois eixos de simetria, fletidas no plano da alma.

Onde C_b é o coeficiente que leva em conta o efeito favorável de o momento não ser uniforme no segmento l_b dado por:

$$C_b = \frac{12,5 M_{\max}}{2,5 M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \leq 3,0$$

Onde M_{\max} é o momento fletor máximo (em valor absoluto) no trecho da viga de comprimento l_b , entre dois pontos de contenção lateral.

M_A , M_B e M_C são momentos fletores no segmento de viga de comprimento l_b , respectivamente nos pontos situados às distâncias $l_b/4$, $l_b/2$ e $3l_b/4$ de um dos dois pontos de contenção lateral.

Em geral C_b pode ser tomado conservadoramente igual a 1,0.

Resistência à flexão de vigas I com dois eixos de simetria, fletidas no plano da alma.

Condição para obter viga longa: $l_b > l_{br}$

$$l_{br} = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{J\beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_W\beta_1^2}{I_y}}}$$

$$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r)W}{EJ}$$

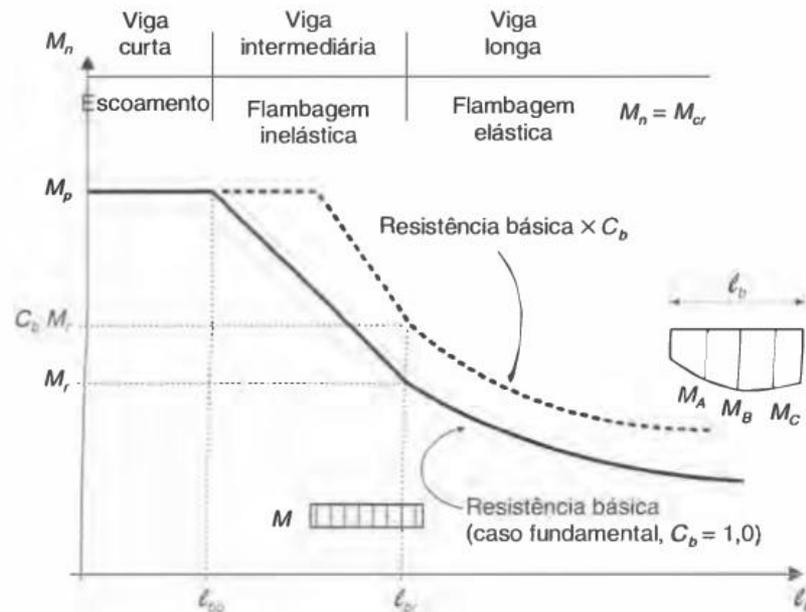


Fig. 6.14 Momento nominal de ruptura de vigas por flambagem lateral. O momento crítico de flambagem elástica (M_{cr}) depende da variação do momento solicitante no segmento l_b , obtendo-se o menor valor para momento constante. No trecho inelástico, a curva é geralmente substituída por uma reta.

c) Viga intermediária: M_n é obtido com interpolação entre M_p e M_r .

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \frac{l_b - l_{bp}}{l_{br} - l_{bp}} \right] < M_p$$

$$M_r = W_x (f_y - \sigma_r)$$

σ_r Tensão residual, considerada 30% da tensão de escoamento do aço utilizado.

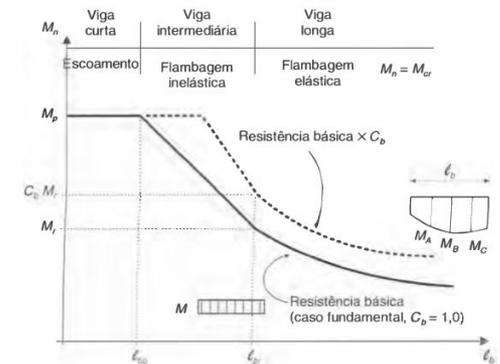


Fig. 6.14 Momento nominal de ruptura de vigas por flambagem lateral. O momento crítico de flambagem elástica (M_r) depende da variação do momento solicitante no segmento ℓ_e , obtendo-se o menor valor para momento constante. No trecho inelástico, a curva é geralmente substituída por uma reta.

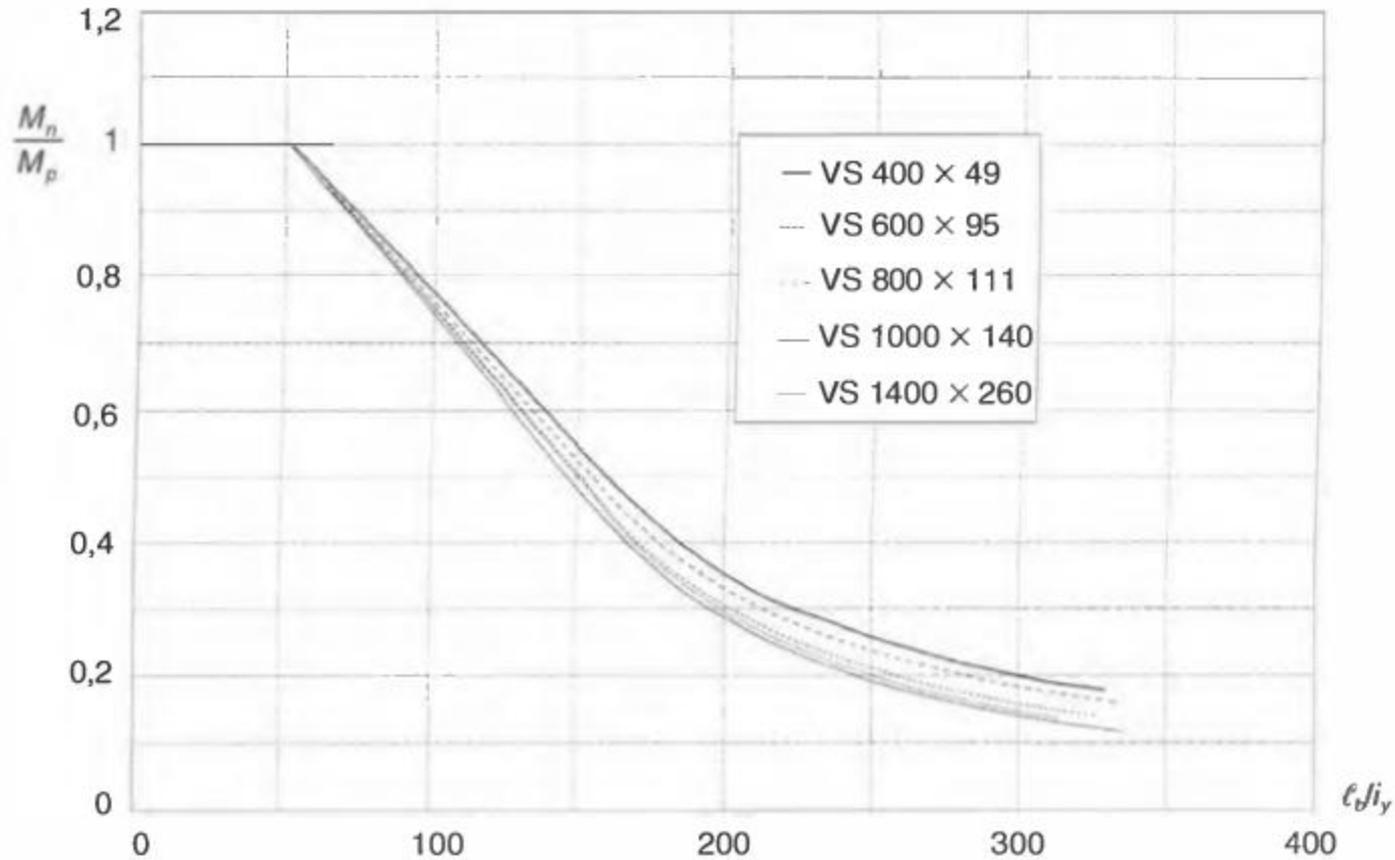


Fig. 6.15 Momento nominal resistente [Eq. (6.16)] de alguns perfis soldados para vigas em função do comprimento ℓ_b sem contenção lateral de acordo com a NBR 8800, porém considerando $\sigma_r = 115$ MPa.

Referências

Pfeil, W., Pfeil, M., "Estruturas de Aço – Dimensionamento básico de acordo com a NBR 8800:2008", 8ª edição, LTC.

Ribeiro Neto, J.G., "Slides – Estruturas Metálicas", PUC-Goiás.