

Barras prismáticas submetidas à flexão

Este capítulo é dedicado ao procedimento de dimensionamento e verificação de barras prismáticas metálicas submetidas a flexão simples.

A metodologia apresentada no capítulo é somente aplicável às seguintes condições:

- Seções I e H com dois eixos de simetria, fletidas em relação a um desses eixos;
- Seções I e H com apenas um eixo de simetria, situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma;
- seções T fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma;
- Seções constituídas por duas cantoneiras em forma de T, fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular ao eixo de simetria;
- Seções U fletidas em relação a um dos eixos centrais de inércia;
- Seções caixão e tubulares retangulares com dois eixos de simetria fletidas em relação a um desses eixos;
- Seções sólidas circulares ou retangulares fletidas em relação a um dos eixos centrais de inércia;
- seções tubulares circulares fletidas em relação a qualquer eixo que passe pelo centro geométrico.

O carregamento transversal deve sempre estar em um plano de simetria, exceto no caso de perfis U fletidos em relação ao eixo perpendicular à alma, quando a resultante do carregamento transversal deve passar pelo centro de cisalhamento da seção transversal ou a torção deve ser impedida.

6.1 Condição de Segurança

No dimensionamento das barras submetidas a momento fletor deve ser atendida a seguinte condição:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (6.1)$$

6.2 Limitações para o momento fletor resistente de cálculo

A validade da análise estática fica assegurada se:

$$M_{Rd} \leq 1,5 W_{min} \frac{f_y}{\gamma_{a1}} \quad (6.2)$$

na qual W_{min} é o módulo de resistência elástico mínimo (ou o menor) da seção transversal da barra, em relação ao eixo de flexão.

Além disso, caso a viga possua ligação parafusada nos extremos ou chapas de reforço na mesa conectadas por parafusos, o momento fletor resistente de cálculo pode ser determinado com base nas propriedades da seção bruta, sem a consideração dos furos, desde que:

$$f_u A_{fe} \geq Y_t f_y A_{fg} \quad (6.3)$$

sendo:

A_{fe} é a área líquida da mesa tracionada, calculada da mesma forma que 4.3.1, mas somente para a mesa que submetida a tração (não leva-se em consideração a alma do perfil nem a mesa que está comprimida, somente a área de mesa tracionada subtraída da área dos furos nessa mesa!);

A_{fg} é a área bruta da mesa tracionada;

Y_t é um coeficiente que vale:

$$Y_t = \begin{cases} 1,0 & \text{quando } \frac{f_y}{f_u} \leq 0,8 \\ 1,1 & \text{quando } \frac{f_y}{f_u} > 0,8 \end{cases} \quad (6.4)$$

Caso a equação 6.3 não se verifique, o momento fletor resistente de cálculo deve ser limitado pelo estado limite último de ruptura por flexão na região dos furos na mesa tracionada, sendo dado por:

$$M_{Rd} = \frac{A_{fe}}{A_{fg}} W_t \frac{f_u}{\gamma_{a2}} \quad (6.5)$$

na qual W_t é o módulo de resistência elástico do lado tracionado da seção relativo ao eixo de flexão, ou seja, é determinado com a distância da linha neutra até a fibra mais tracionada na seção transversal.

6.3 Momento fletor resistente de cálculo - premissas

O cálculo do momento fletor resistente de cálculo considerando a seção transversal bruta é definido em função de:

- Tipo da seção transversal (Perfil I, H, T, Tubular, Caixão, etc);
- Esbeltez da alma (esbelta e não esbelta);
- Estado limite de instabilidade (Flambagem local por torção, flambagem local da mesa, flambagem local da alma, flambagem local da aba e flambagem local da parede do tubo);
- Compacidade da seção transversal (Compacta, semi-compacta e esbelta).

A compacidade da seção transversal é definida como a capacidade de plastificação da seção em função da solicitação de flexão. 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_{pl}) e exibe suficiente capacidade de rotação inelástica para configurar uma rótula plástica. Todas as tensões na seção transversal são iguais a tensão de escoamento do aço, f_y , ver figura 3.2;

Seção semicompacta

É aquela em que a flambagem local ocorre após ter desenvolvido plastificação parcial mas sem apresentar significativa rotação. Algumas tensões na seção transversal são iguais a tensão de escoamento, porém mais próximo a linha neutra a seção ainda está no regime elástico, ver figura 3.3;

Seção Esbelta

Seção na qual a ocorrência da flambagem local impede que seja atingido o momento de início de plastificação. Todas as tensões na seção transversal ainda encontram-se no regime elástico sendo que as fibras mais tracionadas e comprimidas podem apresentar tensão igual a de escoamento do aço, ver figura 3.4.

6.3.1 Definição do momento de plastificação - M_{pl}

O momento de plastificação é o máximo valor para o momento resistente de uma viga submetida a flexão, considerando-se a formação de uma rótula plástica, ou seja, todos os pontos da seção transversal com tensão igual a tensão de escoamento do aço do perfil, e a seção compacta.

A determinação do momento de plastificação da seção é feita em função do módulo de resistência plástico, Z , da seção transversal, e vale:

$$M_{pl} = Z f_y \quad (6.6)$$

O módulo de resistência plástico, por sua vez, é calculado levando-se em conta a situação de plastificação total da seção transversal do perfil, as áreas comprimidas, A_c , e tracionadas, A_t , e o braço de alavanca para a determinação de M_{pl} , z .

Por exemplo, para o perfil I soldado da figura 6.1 o módulo de resistência plástico vale $A_c z$ ou $A_t z$, pois $M_{pl} = A_c z f_y$ ou $M_{pl} = A_t z f_y$.

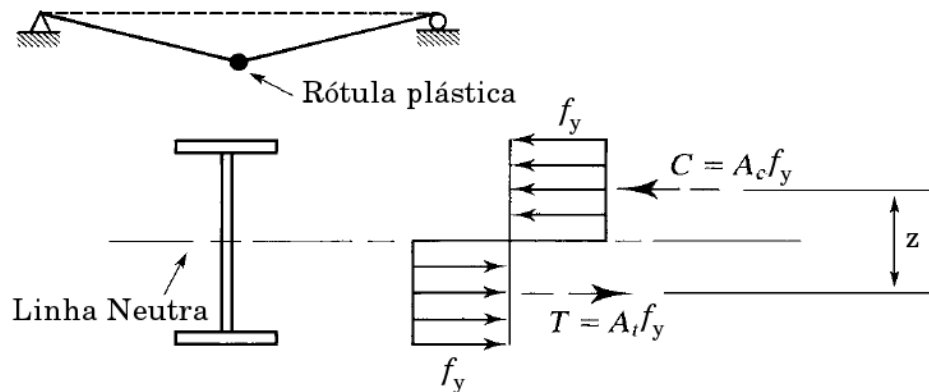


Figura 6.1: Rótula plástica e determinação do módulo de resistência plástico.

Utilizando a primeira definição, $A_c z$, para a determinação de Z , aplicada ao perfil I soldado do exemplo, a área comprimida vale:

$$A_c = b_f t_f + \frac{h}{2} t_w = \frac{A_g}{2} \quad (6.7)$$

sendo A_g a área bruta da seção transversal, b_f a largura da mesa, t_f a espessura da mesa, h a distância entre faces internas das mesas, ou no caso de perfis soldados, a altura da alma e t_w a espessura da alma.

O braço da alavanca é a distância entre os centros de aplicação das resultantes da região comprimida e região tracionada, e para o exemplo vale:

$$z = \frac{2}{A_g} \left[\frac{t_w h^2}{4} + b_f t_f (h + t_f) \right] \quad (6.8)$$

sendo d a altura total do perfil.

Portanto, o módulo de resistência plástico da seção do exemplo vale:

$$Z = A_c z = \frac{t_w h^2}{4} + b_f t_f (h + t_f) \quad (6.9)$$

Considerando o perfil I soldado do exemplo o perfil CVS 300x55, substituindo seus respectivos valores na equação acima, $Z = 847,86 \text{ cm}^3$ e da tabela $Z = 848 \text{ cm}^3$.

6.4 Momento fletor resistente de cálculo de vigas de alma não-esbelta

Vigas de alma não-esbelta são aquelas constituídas por:

- Seções I, H, U, caixão e tubulares retangulares, cujas almas, quando perpendiculares ao eixo de flexão, têm parâmetro de esbeltez $\lambda \leq \lambda_r$, ver item 3.5;

- b) Seções tubulares circulares com relação $\frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y}$, sendo D o diâmetro e t a espessura da parede do tubo;
- c) Seções T;
- d) Seções formadas por duas cantoneiras em T;
- e) Seções sólidas circulares ou sólidas retangulares com quaisquer dimensões.

6.4.1 Determinação do momento fletor resistente de cálculo

A equações para a determinação do momento fletor resistente de cálculo são definidas em função da compacidade da seção transversal. A compacidade por sua vez é definida em função da esbelteza do elemento na seção transversal analisado, λ (seja ele AA ou AL) e dos parâmetros de esbelteza específicos do elemento, o de plastificação λ_p e o elástico, λ_r .

Grupo 1 de seções

O grupo 1 de seções é constituído por seções I, H, U, definidas pelos tipos 1, 2 e 3, seções sólidas retangulares definidas pelo tipo 4 e seções caixão e tubulares retangulares definidas pelo tipo 5.

Para essa seções, o momento fletor resistente de cálculo é determinado por:

Seções Compactas - $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \tag{6.10}$$

Seções Semicompactas - $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{C_b}{\gamma_{a1}} \left[M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \tag{6.11}$$

Seções Esbeltas - $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{M_{cr}}{\gamma_{a1}} \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \tag{6.12}$$

Os valores de λ , λ_p , λ_r , M_r e M_{cr} , são dados em função do tipo da seções, definidos pelo formato da seção e eixo de flexão, para cada estado limite de instabilidade, flambagem local da alma (FLA), flambagem local da mesa (FLM) e flambagem lateral por torção (FLT). Todos os estados limites de instabilidade devem ser verificados. Os valores de C_b são dados em 6.5.

TIPO 1

Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U não sujeitas a momento de torção, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia.

.....
FLA flambagem local da alma

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \qquad \lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = f_y W \qquad M_{cr} \rightarrow \text{caso de cálculo como viga de alma esbelta!}$$

.....
FLM flambagem local da mesa

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{b}{t} \qquad \lambda_p = 0,38\sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = C_{\lambda_{ls}}\sqrt{\frac{E}{0,7f_y}}$$

Definições relativas à esbeltez λ :

- Para mesas de seções I e H, b é a metade da largura total;
- Para mesas de seções U, b é a largura total;

Definições do coeficiente $C_{\lambda_{ls}}$, que define uma variação de λ_r entre perfis laminados e soldados:

- $C_{\lambda_{ls}} = 0,83$ para perfis laminados;
- $C_{\lambda_{ls}} = 0,95\sqrt{k_c}$ para perfis soldados.

sendo o coeficiente k_c dado por:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{\frac{h}{t_w}}} \begin{cases} \geq 0,35 \\ \leq 0,76 \end{cases} \quad (6.13)$$

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = 0,7f_y W \qquad M_{cr} = C_{M_{ls}} \frac{W_c E}{\lambda^2}$$

sendo W_c o módulo de resistência elástico relativo à mesa comprimida, ou seja, medido com a distância da linha neutra até a fibra mais comprimida da seção.

Definições do coeficiente $C_{M_{ls}}$, que define uma variação de M_{cr} entre perfis laminados e soldados:

- $C_{M_{ls}} = 0,69$ para perfis laminados;
- $C_{M_{ls}} = 0,9k_c$ para perfis soldados.

.....
FLT flambagem lateral por torção

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{L_{b,x}}{r_y} \qquad \lambda_p = 1,76\sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = \frac{1,38\sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27C_w \beta_1^2}{I_y}}}$$

sendo:

$$\beta_1 = \frac{0,7f_y W}{EJ}$$

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = 0,7f_y W \qquad M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_{b,x}^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_{b,x}^2}{C_w} \right)}$$

O valor da constante de empenamento C_w pode ser aproximado pelas equações:

- Para seções I, laminadas ou soldadas: $C_w = \frac{I_y(d-t_f)^2}{4}$
- Para seções U, laminadas ou soldadas: $C_w = \frac{t_f(b_f - 0,5t_w)^3(d-t_f)^2}{12} \left[\frac{3(b_f - 0,5t_w)t_f + 2(d-t_f)t_w}{6(b_f - 0,5t_w)t_f + (d-t_f)t_w} \right]$

TIPO 2

Seções I e H com apenas um eixo de simetria situado no plano médio da alma, fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia, obedecendo as seguintes limitações:

$$\frac{1}{9} \leq \frac{I_{yfc}}{I_{yft}} \leq 9$$

sendo:

I_{yfc} o momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (se no comprimento destravado existirem momentos positivo e negativo, usar a mesa de menor momento de inércia em relação ao eixo mencionado);

I_{yft} o momento de inércia da mesa tracionada em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma (se no comprimento destravado existirem momentos positivo e negativo, usar a mesa de maior momento de inércia em relação ao eixo mencionado).

Os momentos de inércia acima são calculados somente para as mesas, sem levar em conta a alma, ou seja:

$$I_{yfc} = \frac{t_f b_{fc}^3}{12}$$

no caso, b_{fc} é a largura da mesa comprimida.

Além disso, a soma das áreas da menor mesa e da alma deve ser superior à área da maior mesa.

$$A_{fmenor} + A_w > A_{fmaior}$$

.....
FLA flambagem local da alma

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{h_c}{t_w} \quad \lambda_p = \frac{\frac{h_c}{h_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}}}{\left(0,54 \frac{M_{pl}}{M_r} - 0,09\right)^2} \leq \lambda_r \quad \lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

sendo h_c o valor de duas vezes a distância do centro geométrico da seção transversal à face interna da mesa comprimida e h_p o valor de duas vezes a distância da linha neutra plástica da seção transversal à face interna da mesa comprimida.

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = f_y W$$

$M_{cr} \rightarrow$ caso de cálculo como viga de alma esbelta!

.....
FLM flambagem local da mesa

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{b}{t} \quad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \lambda_r = C_{\lambda ls} \sqrt{\frac{E}{0,7 f_y}}$$

sendo o coeficiente $C_{\lambda ls}$ idêntico ao definido para seções do tipo 1.

Definições relativas à esbelteza λ :

– Para mesas de seções I e H, b é a metade da largura total;

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = 0,7f_y W_c \qquad M_{cr} = C_{Mls} \frac{W_c E}{\lambda^2}$$

sendo W_c o módulo de resistência elástico relativo à mesa comprimida. O coeficiente C_{Mls} também é idêntico ao definido para seções do tipo 1.

.....
FLT flambagem lateral por torção

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{L_{b,x}}{r_{yc}} \qquad \lambda_p = 1,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_{yc} J \beta_1} \sqrt{\beta_2 + \sqrt{\beta_2^2 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}$$

sendo:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{0,7f_y W_c}{EJ} \\ \beta_2 &= 5,2\beta_1\beta_3 + 1 \\ \beta_3 &= 0,45 \left(d - \frac{t_{fs} - t_{fi}}{2} \right) \left(\frac{\alpha_y - 1}{\alpha_y + 1} \right) \\ \alpha_y &= \frac{I_y f_c}{I_y f_t} \end{aligned}$$

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = 0,7f_y W_c \leq f_y W_t \qquad M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L_{b,x}^2} \left[\beta_3 + \sqrt{\beta_3^2 + \frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_{b,x}^2}{C_w} \right)} \right]$$

O valor da constante de empenamento C_w pode ser aproximada pelas equações:

$$C_w = \frac{\left(d - \frac{t_{fs} + t_{fi}}{2} \right)^2}{12} \left(\frac{t_{fi} b_{fi}^3 t_{fs} b_{fs}^3}{t_{fi} b_{fi}^3 + t_{fs} b_{fs}^3} \right)$$

sendo que b_{fs} e b_{fi} representam as larguras totais das mesas superior e inferior e t_{fs} e t_{fi} representam as espessuras das mesas superior e inferior.

TIPO 3

Seções I e H com dois eixos de simetria e seções U, todas fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia.

.....
FLA flambagem local da alma

Aplica-se só à alma da seção U quando comprimida pelo momento fletor. Não se aplica às seções I e H.

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \qquad \lambda_p = 1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = f_y W_{ef} \qquad M_{cr} = \frac{W_{ef}^2}{W_c} f_y$$

onde W_c é o módulo de resistência elástico relativo ao eixo de flexão considerando a distância da linha neutra a fibra mais comprimida e W_{ef} é o módulo de resistência elástico relativo ao eixo de flexão considerando a distância da linha neutra a fibra mais comprimida, que no caso é igual a x_{cg} , calculado com a altura da alma igual a altura efetiva h_{ef} dada por:

$$h_{ef} = 1,92t_w \sqrt{\frac{E}{f_y}} \left(1 - \frac{0,34t_w}{h} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \leq h \tag{6.14}$$

.....
FLM flambagem local da mesa

Seções I e H sempre se aplica e para seção U aplica-se somente quando a extremidade livre das mesas for comprimida pelo momento fletor.

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{b}{t} \qquad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = C_{\lambda ls} \sqrt{\frac{E}{0,7f_y}}$$

Definições relativas à esbelteza λ :

- Para mesas de seções I e H, b é a metade da largura total;
- Para mesas de seções U, b é a largura total;

Definições do coeficiente $C_{\lambda ls}$, que define uma variação de λ_r entre perfis laminados e soldados:

- $C_{\lambda ls} = 0,83$ para perfis laminados;
- $C_{\lambda ls} = 0,95\sqrt{k_c}$ para perfis soldados.

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = 0,7f_y W_c \qquad M_{cr} = C_{Mls} \frac{W_c E}{\lambda^2}$$

sendo W_c o módulo de resistência elástico relativo à mesa comprimida, ou seja, medido com a distância da linha neutra até a fibra mais comprimida da seção.

Definições do coeficiente C_{Mls} , que define uma variação de M_{cr} entre perfis laminados e soldados:

- $C_{Mls} = 0,69$ para perfis laminados;
- $C_{Mls} = 0,9k_c$ para perfis soldados.

.....
FLT flambagem lateral por torção

Não se aplica.

TIPO 4

Seções sólidas retangulares fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia.

.....
FLA flambagem local da alma

Não se aplica.

.....
FLM flambagem local da mesa

Não se aplica.

.....
FLT flambagem lateral por torção

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \qquad \lambda_p = \frac{0,13E}{M_{pl}} \sqrt{JA} \qquad \lambda_r = \frac{2,0E}{M_r} \sqrt{JA}$$

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = f_y W \qquad M_{cr} = \frac{2,0C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$$

Os valores de C_b são dados em 6.5.

TIPO 5

Seções caixão e tubulares retangulares, duplamente simétricas, fletidas em relação a um dos eixos de simetria que seja paralelo a dois lados.

.....
FLA flambagem local da alma

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \qquad \lambda_p = C_{\lambda tc} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Definições do coeficiente $C_{\lambda tc}$, que define uma variação de λ_p entre seções caixão e tubulares retangulares:

- $C_{\lambda tc} = 3,76$ para seções caixão;
- $C_{\lambda tc} = 2,42$ para seções tubulares retangulares.

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = f_y W \qquad M_{cr} \rightarrow \text{seções tipo 5 não devem ter almas esbeltas!}$$

.....
FLM flambagem local da mesa

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{b}{t} \qquad \lambda_p = 1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E}{0,7f_y}}$$

Definições relativas à esbeltez λ :

- Para seções tubulares retangulares, b é a largura da parte plana;
- Para perfis caixão, b é a distância livre entre almas.

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = f_y W_{ef} \qquad M_{cr} = \frac{W_{ef}^2}{W} f_y$$

onde W_{ef} é o módulo de resistência mínimo elástico relativo ao eixo de flexão para a seção que tem uma mesa comprimida, considerando a largura dessa mesa igual a largura efetiva b_{ef} , dado pela equação 5.18, com $\sigma = f_y$ e $c_a = 0,38$ para seções tubulares retangulares e $c_a = 0,34$ para seções caixão.

FLT flambagem lateral por torção

Só é aplicável quando o eixo de flexão for o de maior momento de inércia.

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{L_b}{r_y} \qquad \lambda_p = \frac{0,13E}{M_{pl}} \sqrt{JA} \qquad \lambda_r = \frac{2,0E}{M_r} \sqrt{JA}$$

Momentos resistentes: M_r, M_{cr}

$$M_r = 0,7f_y W \qquad M_{cr} = \frac{2,0C_b E}{\lambda} \sqrt{JA}$$

Os valores de C_b são dados em 6.5.

Grupo 2 de seções

O grupo 2 de seções é constituído por seções T fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma e seções formadas por duas cantoneiras iguais em contato unidas por solda contínua ou com afastamento correspondente à espessura de chapas espaçadoras, constituindo uma seção tipo T.

Para essas seções, o momento fletor resistente de cálculo determinado para o caso específico de flambagem local da mesa, **FLM**, é calculado em função da compacidade da seção, sendo:

Seções Compactas - $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \tag{6.15}$$

Seções Semicompactas - $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(T_1 - T_2 \lambda \sqrt{\frac{f_y}{E}} \right) f_y W_c \tag{6.16}$$

Seções Esbeltas - $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{T_3 E W_c}{\lambda^2} \tag{6.17}$$

Os valores de $\lambda, \lambda_p, \lambda_r, T_1, T_2$ e T_3 são dados abaixo.

.....
FLA flambagem local da alma

Não se aplica.

.....
FLM flambagem local da mesa

Aplicável apenas se a mesa estiver total ou parcialmente comprimida.

Esbeltezes: $\lambda, \lambda_p, \lambda_r$

$$\lambda = \frac{b}{t} \qquad \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \qquad \lambda_r = 1,00 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Definições relativas à esbeltez λ :

- Para seções seções T, b é a metade da largura da mesa $b_f/2$;
- Para T formadas por cantoneiras, b é a largura da aba.

Constante para cálculo dos momentos resistentes:

Quando a mesa do T ou as abas das cantoneiras paralelas ao eixo de flexão estiverem comprimidos:

$$T_1 = 1,19 \qquad T_2 = 0,50 \qquad T_3 = 0,69$$

Quando a alma do T ou as abas das cantoneiras perpendiculares ao eixo de flexão estiverem comprimidos (T invertido):

$$T_1 = 2,43 \qquad T_2 = 1,72 \qquad T_3 = 0,71$$

.....
FLT flambagem lateral por torção

O momento fletor resistente de cálculo para o caso específico de flambagem lateral por torção, **FLT**, não depende da compactidade da seção e é dado por:

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{\pi \sqrt{EI_y G J}}{L_b} \left(B + \sqrt{1 + B^2} \right) \leq \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (6.18)$$

$$B = \pm 2,3 \frac{d}{L_b} \sqrt{\frac{I_y}{J}}$$

Usa-se o sinal positivo usado quando a extremidade da alma oposta à mesa estiver tracionada e o negativo em caso contrário (se essa extremidade estiver comprimida em algum ponto ao longo do comprimento destravado, o sinal negativo deve ser usado).

Grupo 3 de seções

O grupo 3 de seções é constituído por seções sólidas circulares e retangulares fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia.

Seções sólidas circulares e retangulares quando fletidas em relação ao eixo de menor momento de inércia, não sofrem qualquer tipo de instabilidade por flambagem antes de atingir a resistência total da seção transversal, por isso:

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (6.19)$$

Grupo 4 de seções

O grupo 4 de seções é constituído por seções tubulares circulares. O estado limite de flambagem local da parede do tubo (FLTP), o único aplicável, é calculado também em função da compactidade da seção transversal do tubo:

Seções Compactas - $\lambda \leq \lambda_p$

$$M_{Rd} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{a1}} \quad (6.20)$$

Seções Semicompactas - $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \left(\frac{0,021Et}{D} + f_y \right) W \quad (6.21)$$

Seções Esbeltas - $\lambda > \lambda_r$

$$M_{Rd} = \frac{1}{\gamma_{a1}} \frac{0,33Et}{D} W \quad (6.22)$$

Os valores de λ , λ_p e λ_r são dados abaixo.

.....
FLTP flambagem local da parede do tubo

$$\lambda = \frac{D}{t} \leq 0,45 \frac{E}{f_y} \qquad \lambda_p = 0,07 \frac{E}{f_y} \qquad \lambda_r = 0,31 \frac{E}{f_y}$$

6.5 Determinação do coeficiente C_b

O coeficiente C_b é um fator de modificação para diagrama de momento fletor não-uniforme para o comprimento destravado analisado. Esse coeficiente somente possui valor diferente de 1,0 para certas condições dentro do estado limite de flambagem lateral por torção.

Estados limites de flambagem local da alma e local da mesa, FLA e FLM

Para todos os estados limites FLA e FLM o coeficiente C_b sempre vale:

$$C_b = 1,0 \qquad (6.23)$$

Estados limites de flambagem lateral por torção, FLT

Mesas com contenção lateral contínua

Nas vigas com seções I, H e U, fletidas em relação ao eixo central de inércia perpendicular à alma, e seções caixão e tubulares retangulares fletidas em relação a um eixo central de inércia, simétricas em relação ao eixo de flexão, em um comprimento destravado (L_b) no qual uma das mesas encontra-se livre para se deslocar lateralmente e a outra mesa possui contenção lateral contínua contra esse tipo de deslocamento, o coeficiente C_b é dado por:

- a) Quando a mesa com contenção lateral contínua estiver tracionada em pelo menos uma extremidade do comprimento destravado:

$$C_b = 3,0 - \frac{2 M_1}{3 M_0} - \frac{8}{3} \frac{M_2}{(M_0 + M_1)} \qquad (6.24)$$

sendo:

M_0 é o valor do maior momento fletor solicitante de cálculo, tomado com sinal negativo, que comprime a mesa livre nas extremidades do comprimento destravado;

M_1 é o valor do momento fletor solicitante de cálculo na outra extremidade do comprimento destravado. Se esse momento comprimir a mesa livre, deve ser tomado com sinal negativo nos segundo e terceiro termos da equação. Se tracionar a mesa livre, deve ser tomado com sinal positivo no segundo termo da equação e igual a zero no terceiro termo;

M_2 é o momento fletor solicitante de cálculo na seção central do comprimento destravado, com sinal positivo se tracionar a mesa livre e sinal negativo se tracionar a mesa com contenção lateral contínua.

- b) Em trechos com momento nulo nas extremidades, submetidos a uma força transversal uniformemente distribuída, com apenas a mesa tracionada contida continuamente contra deslocamento lateral:

$$C_b = 2,00 \qquad (6.25)$$

- c) nos demais casos não previstos nos item anteriores para seções com contenção lateral contínua:

$$C_b = 1,00 \qquad (6.26)$$

Mesas sem contenção lateral contínua

- a) Nos trechos em balanço entre uma seção com restrição a deslocamento lateral e à torção e a extremidade livre:

$$C_b = 1,00 \qquad (6.27)$$

b) Nos demais casos:

$$C_b = \frac{12,5M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} R_m \leq 3,0 \quad (6.28)$$

sendo:

M_{max} é o valor do momento fletor máximo solicitante de cálculo, em módulo, no comprimento destravado;

M_A é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da esquerda;

M_C é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção situada a um quarto do comprimento destravado, medido a partir da extremidade da direita;

M_B é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, na seção central do comprimento destravado;

R_m é um parâmetro de monossimetria da seção transversal, que vale:

$$R_m = \begin{cases} 0,5 + 2 \left(\frac{I_{yfc}}{I_y} \right)^2 & \text{para seções com um eixo de simetria, fletidas em relação ao eixo que não é} \\ 1,00 & \text{todos os demais casos} \end{cases}$$

com:

I_{yfc} é o momento de inércia da mesa comprimida em relação ao eixo de simetria (como a curvatura é reversa, esse momento de inércia refere-se à mesa de menor momento de inércia);

I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo de simetria.

Em seções com um eixo de simetria, fletidas em relação ao eixo que não é de simetria, sujeitas à curvatura reversa, a verificação à FLT deve ser feita para as duas mesas (cada mesa terá um momento fletor resistente de cálculo, que deve ser igual ou superior ao máximo momento solicitante de cálculo que causa compressão na mesma). Nos demais casos, o momento fletor resistente de cálculo é constante ao longo do comprimento destravado e deve ser igual ou superior ao máximo momento solicitante de cálculo (positivo ou negativo) nesse comprimento.