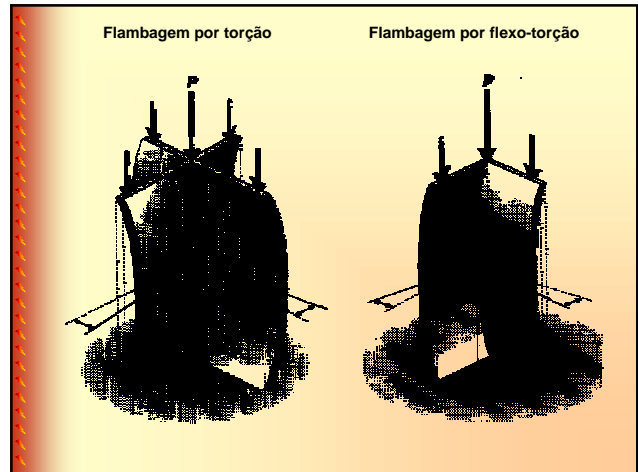


INSTABILIDADE DE CHAPAS parte 2



COMPRESSÃO CENTRADA

- Flambagem da barra por flexão, por torção ou por flexo-torção:

$$N_{c,Rd} = \frac{\rho \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma}$$

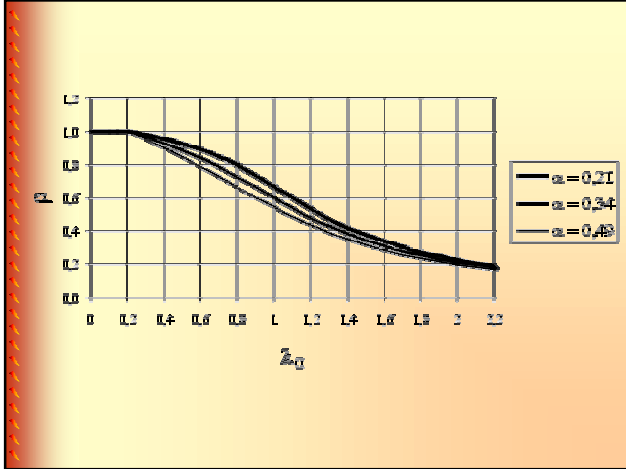
$$\rho = \frac{1}{\beta + \sqrt{\beta^2 - \lambda_0^2}} \leq 1$$

$$\beta = \frac{1 + \alpha \cdot (\lambda_0 - 0,2) + \lambda_0^2}{2}$$

curva a: $\alpha = 0,21$
 curva b: $\alpha = 0,34$
 curva c: $\alpha = 0,49$

Limitação de esbeltez: $KL/r \leq 200$

Tipos de seção transversal	Eixos	Curvas
	X-X Y-Y	a
	Empenamento ξ Empenamento η X-X ou Y-Y X-X ou Y-Y	b c
	X-X Y-Y	a b
	Indicadas	b
	Indicadas	c
Para demais seções	Aplicáveis	c



Valores de ρ para curva b ($\alpha = 0,34$)

λ_0	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	λ_0
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,0
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,1
0,2	1,000	0,996	0,993	0,989	0,986	0,982	0,979	0,975	0,971	0,968	0,2
0,3	0,964	0,960	0,957	0,953	0,949	0,945	0,942	0,938	0,934	0,930	0,3
0,4	0,926	0,922	0,918	0,914	0,910	0,906	0,902	0,897	0,893	0,889	0,4
0,5	0,884	0,880	0,875	0,871	0,866	0,861	0,857	0,852	0,847	0,842	0,5
0,6	0,837	0,832	0,827	0,822	0,816	0,811	0,806	0,800	0,795	0,789	0,6
0,7	0,784	0,778	0,772	0,766	0,761	0,755	0,749	0,743	0,737	0,731	0,7
0,8	0,724	0,718	0,712	0,706	0,699	0,693	0,687	0,680	0,674	0,668	0,8
0,9	0,661	0,655	0,648	0,642	0,635	0,629	0,623	0,616	0,610	0,603	0,9
1,0	0,597	0,591	0,584	0,578	0,572	0,566	0,559	0,553	0,547	0,541	1,0
1,1	0,535	0,529	0,523	0,518	0,512	0,506	0,500	0,495	0,489	0,484	1,1
1,2	0,478	0,473	0,467	0,462	0,457	0,452	0,447	0,442	0,437	0,432	1,2
1,3	0,427	0,422	0,417	0,413	0,408	0,404	0,399	0,395	0,390	0,386	1,3
1,4	0,382	0,378	0,373	0,369	0,365	0,361	0,357	0,354	0,350	0,346	1,4
1,5	0,342	0,339	0,335	0,331	0,328	0,324	0,321	0,318	0,314	0,311	1,5
1,6	0,308	0,305	0,302	0,299	0,295	0,292	0,289	0,287	0,284	0,281	1,6
1,7	0,278	0,275	0,273	0,270	0,267	0,265	0,262	0,259	0,257	0,255	1,7
1,8	0,252	0,250	0,247	0,245	0,243	0,240	0,238	0,236	0,234	0,231	1,8
1,9	0,229	0,227	0,225	0,223	0,221	0,219	0,217	0,215	0,213	0,211	1,9
2,0	0,209	0,208	0,206	0,204	0,202	0,200	0,199	0,197	0,195	0,194	2,0
2,1	0,192	0,190	0,189	0,187	0,186	0,184	0,182	0,181	0,179	0,178	2,1
2,2	0,176	0,175	0,174	0,172	0,171	0,169	0,168	0,167	0,165	0,164	2,2

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{A_{ef} \cdot f_y}{N_e}}$$

A_{ef} — área efetiva da seção transversal da barra, adotando $\sigma = \rho \cdot f_y$. Nesse caso, ρ pode ser determinado tomando-se diretamente $A_{ef} = A$ para o cálculo de λ_0 , dispensando processo iterativo;

N_e — força normal de flambagem elástica por flexão, torção ou flexo-torção.

Para flambagem por flexão:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{\lambda_{pi}} = \frac{\frac{\ell_n}{r}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{\sqrt{A \cdot f_y}}{\sqrt{\pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{\ell_n^2}}} = \sqrt{\frac{A_{ef} \cdot f_y}{N_e}}$$

$$\lambda_0 \text{ (seção bruta)} \quad \lambda_0 = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_e}}$$

↓

ρ (seção bruta)

↓

$$\sigma = \rho \cdot f_y$$

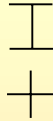
↓

largura efetiva

↓

$$A_{ef} \quad N_{c,Rd} = \frac{\rho \cdot A_{ef} \cdot f_y}{\gamma}$$

Perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto



Determinação de N_e :

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{(K_x \cdot L_x)^2}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2}$$

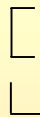
Perfis com dupla simetria ou simétricos em relação a um ponto



$$N_{et} = \frac{1}{r_0^2} \cdot \left[\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_w}{(K_t \cdot L_t)^2} + G \cdot I_t \right]$$

C_w — constante de empenamento da seção;
 E — módulo de elasticidade;
 G — módulo de elasticidade transversal;
 I_t — momento de inércia à torção uniforme;
 $K_x L_x, K_y L_y, K_t L_t$ — comprimentos efetivos de flambagem por flexão e por torção (sem garantia de impedimento ao empenamento: $K_t = 1,0$);
 $r_0 = [\frac{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2}{2}]^{1/2}$ - raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção;
 r_x e r_y — raios de giração da seção bruta;
 x_0 e y_0 — coordenadas do centro de torção, em relação ao centróide da seção.

Perfis monossimétricos



$$N_{ey} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(K_y \cdot L_y)^2}$$

$$N_{ext} = \frac{N_{ex} + N_{et}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot N_{ex} \cdot N_{et} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_0}{r_0} \right)^2 \right]}{(N_{ex} + N_{et})^2}} \right]$$

N_{ex} e N_{et} — forças normais de flambagem elástica.

Caso o eixo y seja o eixo de simetria, basta substituir y por x , x por y e x_0 por y_0 .

Perfis assimétricos

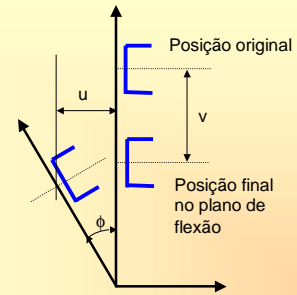
$$r_0^2 \cdot (N_e - N_{ex}) \cdot (N_e - N_{ey}) \cdot (N_e - N_{et}) - N_{e_2} \cdot (N_e - N_{ey}) \cdot x_0^2 - N_{e_2} \cdot (N_e - N_{ex}) \cdot y_0^2 = 0$$

FLEXÃO SIMPLES

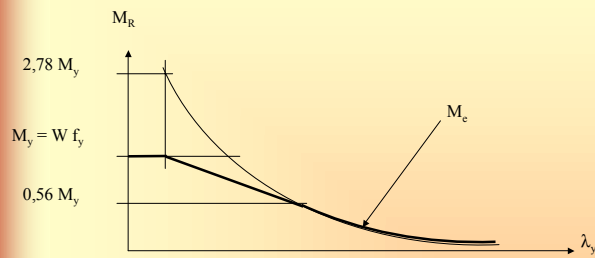
- Escoamento da seção efetiva.

$$M_{Rd} = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad (\gamma = 1,1)$$

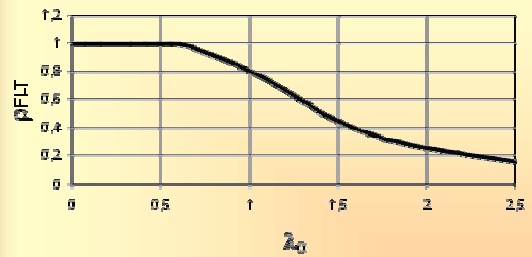
W_{ef} — módulo de resistência elástico da seção efetiva calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, com γ calculada para o estado limite último de escoamento da seção.



Flambagem lateral



$$M_{Rd} = \frac{\rho_{FLT} \cdot W_{e,ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$



$$\lambda_0 \leq 0,6 \rightarrow \rho_{FLT} = 1,0$$

$$0,6 < \lambda_0 < 1,336 \rightarrow \rho_{FLT} = 1,11 \cdot (1 - 0,278 \cdot \lambda_0^2)$$

$$\lambda_0 \geq 1,336 \rightarrow \rho_{FLT} = \frac{1}{\lambda_0^2}$$

$$M_{Rd} = \frac{\rho_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y}{\gamma} \quad \gamma = 1,1$$

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}}$$

W_c — módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra comprimida;
 M_e — momento fletor de flambagem lateral com torção;
 $W_{c,ef}$ — módulo de resistência elástico da seção efetiva em relação à fibra comprimida, calculado com base nas larguras efetivas dos elementos, adotando $\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y$

$$\lambda_0 \text{ (seção bruta)} \quad \lambda_0 = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}}$$

ρ_{FLT} (seção bruta)

$$\sigma = \rho_{FLT} \cdot f_y$$

largura efetiva

$W_{c,ef}$

$$M_{Rd} = \frac{\rho_{FLT} \cdot W_{c,ef} \cdot f_y}{\gamma}$$

Barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo x:

$$M_e = C_b \cdot I_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{et}}$$

para $K_y L_y = K_t L_t = L$

$$M_e = C_b \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{\ell^2} \cdot \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \cdot \left(1 + \frac{G \cdot I_t}{E \cdot C_w} \cdot \frac{\ell^2}{\pi^2} \right)}$$

Barras com seção Z ponto-simétrica, com carregamento no plano da alma:

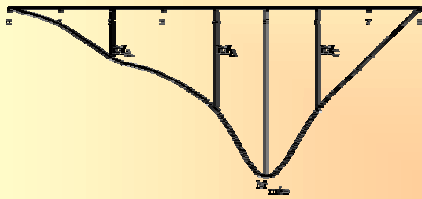
$$M_e = \frac{C_b \cdot I_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{et}}}{2}$$

Barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x:

$$M_e = C_b \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot G \cdot I_t}$$

C_b - coeficiente de equivalência de momento na flexão

$$C_b = \frac{12,5 \cdot M_{\text{máx}}}{2,5 \cdot M_{\text{máx}} + 3 \cdot M_A + 4 \cdot M_B + 3 \cdot M_C}$$



Balanços com a extremidade livre sem contenção lateral: C_b = 1,0

FLEXÃO COMPOSTA

■ **Flexo-compressão**

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{c,Rd}} + \frac{C_{mx} \cdot M_{x,Sd}}{\left(1 - \frac{N_{c,Sd}}{N_{ex}}\right) \cdot M_{x,Rd}} + \frac{C_{my} \cdot M_{y,Sd}}{\left(1 - \frac{N_{c,Sd}}{N_{ey}}\right) \cdot M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

e

$$\frac{N_{c,Sd}}{N_{0,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1,0$$

- N_{c,Sd} — valor de cálculo da força normal de compressão solicitante, considerada constante na barra;
- M_{x,Sd}; M_{y,Sd} — valores de cálculo dos momentos fletores solicitantes, na seção considerada;
- N_{c,Rd} — valor de cálculo da força normal de compressão resistente;
- N_{0,Rd} — valor de cálculo da força normal de compressão resistente, tomando-se ρ = 1,0;
- M_{x,Rd}; M_{y,Rd} — valores de cálculo dos momentos fletores resistentes, com C_b = 1,0;
- N_{ex} = π²EI_x / (K_xL_x)² e N_{ey} = π²EI_y / (K_yL_y)²;
- I_x; I_y — momentos de inércia da seção bruta;
- (K_xL_x); (K_yL_y) — comprimentos efetivos de flambagem.

C_{mx} e C_{my} — coeficientes de equivalência de momento na flexão composta

Barras de estruturas indeslocáveis	
sem ações transversais entre as extremidades	C _m = 0,6 + 0,4(M ₁ /M ₂)
sujeitas à ações transversais entre as extremidades	ambas as extremidades engastadas: C _m = 0,85 demais casos: C _m = 1,0
Barras de estruturas deslocáveis	C _m = 1,0

FLEXÃO COMPOSTA

■ Flexo-tração

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{xt,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{yt,Rd}} + \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

e

$$\frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} - \frac{N_{t,Sd}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

- $N_{t,Sd}$ — valor de cálculo da força normal de tração solicitante de cálculo, considerada constante na barra;
- $M_{x,Sd}$; $M_{y,Sd}$ — momentos flettores solicitantes de cálculo, na seção considerada
- $N_{t,Rd}$ — força normal de tração resistente de cálculo
- $M_{xt,Rd}$ e $M_{yt,Rd}$ — momentos flettores resistentes de cálculo, na seção considerada, calculados com base no escoamento da fibra tracionada da seção bruta, dados por $M_{xt,Rd} = W_{xt} \cdot f_t / \gamma$ e $M_{yt,Rd} = W_{yt} \cdot f_t / \gamma$ com $\gamma = 1,1$;
- W_{xt} e W_{yt} — módulos de resistência elásticos da seção bruta, referentes à fibra tracionada;
- $M_{x,Rd}$ e $M_{y,Rd}$ — momentos flettores resistentes de cálculo

Deslocamentos limites recomendados

Descrição	d ₁	d ₂	Exemplos de Combinações ^{2), 3)}
- Terças e longarinas de fechamento em geral ^{1), 3)}	L/180	-	F ₀₁
Longarinas de fechamento em geral ³⁾	-	L/120	F ₀₁
Longarinas suportando fechamentos sujeitos à fissuração e/ou Componentes sensíveis a deslocamentos excessivos	-	L/180	F ₀₁
- Terças em geral ³⁾	L/180	-	F ₀₁ + F ₀₂ + 0,2F ₀₃
- Terças suportando fechamentos sujeitos à fissuração e/ou componentes sensíveis a deslocamentos excessivos ³⁾	-	L/250	F ₀₁ + 0,3F ₀₂ F ₀₁ + 0,2F ₀₃
- Treliças e vigas de cobertura em geral ³⁾	L/250	-	F ₀₁ + F ₀₂ + 0,4F ₀₃ + 0,2F ₀₄ F ₀₁ + F ₀₂ + 0,3F ₀₃ + 0,2F ₀₄
		L/180	F ₀₁
- Vigas de piso em geral	L/300	-	F ₀₁ + F ₀₂ + 0,4F ₀₃ F ₀₁ + F ₀₂ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾ F ₀₁ + 0,4F ₀₃
	-	L/350	F ₀₁ + F ₀₂ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾ F ₀₁ + F ₀₂ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾
- Vigas de piso suportando acabamentos sujeitos à fissuração (alvenarias, painéis rígidos, etc.) e esquadrias	L/350	-	F ₀₁ + F ₀₂ + 0,4F ₀₃ F ₀₁ + F ₀₂ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾
	-	L/400	F ₀₁ + F ₀₂ + 0,4F ₀₃ F ₀₁ + F ₀₂ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾
- Vigas de piso suportando pilares	L/400	-	F ₀₁ + F ₀₂ + 0,4F ₀₃ F ₀₁ + F ₀₂ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾
	-	L/500	F ₀₁ + 0,4F ₀₃ F ₀₁ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾
Galpões em geral e edifícios de um pavimento: - Deslocamento horizontal do topo em relação à base ⁶⁾	-	H/300	F ₀₁ + 0,3F ₀₂ + 0,4F ₀₃ F ₀₁ + 0,2F ₀₂ + 0,3F ₀₃

Descrição	d ₁	d ₂	Exemplos de Combinações ^{2), 3)}
Edifícios de dois ou mais pavimentos: - Deslocamento horizontal do topo em relação à base ⁶⁾	-	H/400	F ₀₁ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾
- Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	-	h/300	F ₀₁ + ψ ₁ F ₀₂ ⁷⁾

¹⁾ L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base), h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos), d₁ é o deslocamento referente à combinação de todas as ações e d₂ é o deslocamento referente à combinação das ações variáveis.

²⁾ F₀₁ são as ações permanentes; F₀₁ é a ação do vento; F₀₂ é a sobrecarga no telhado ou piso e F₀₃ são as ações provenientes de equipamentos de elevação e transporte.

³⁾ As ações variáveis favoráveis não devem ser consideradas na combinação.

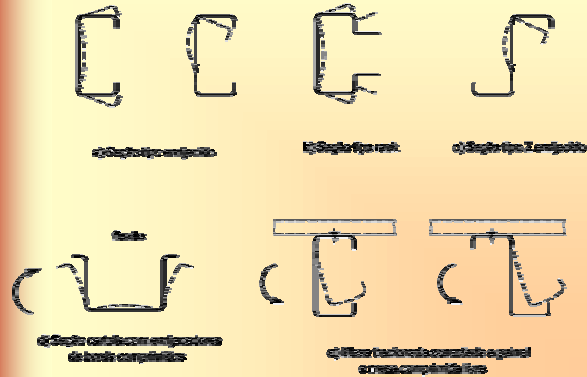
⁴⁾ Deslocamentos entre linhas de correntes, no plano das mesmas.

⁵⁾ Em telhados com pequena declividade, o deslocamento limite também deve ser adotado de maneira a se evitar a ocorrência de empoeamento.

⁶⁾ No caso de paredes de alvenaria, limitar o deslocamento horizontal (perpendicular à parede) de maneira que a abertura da fissura que possa ocorrer na base da parede não seja superior a 2,0mm, entendida a parede como painel rígido (figura A.1).

⁷⁾ ψ₁ é o fator de utilização referente ao valor freqüente da sobrecarga, conforme tabela 2.

FLAMBAGEM POR DISTORÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL



Flambagem por distorção da seção transversal: compressão centrada

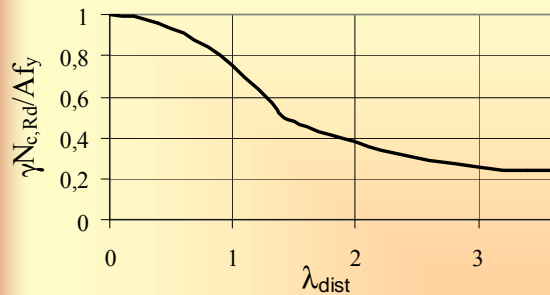
$$N_{c,Rd} = A \cdot f_y \cdot \frac{(1 - 0,25 \cdot \lambda_{dist}^2)}{\lambda} \quad \text{para } \lambda_{dist} < 1,414$$

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_y \cdot \frac{0,055 \cdot (\lambda_{dist} - 3,6)^2 + 0,237}{\lambda} \quad \text{para } 1,414 \leq \lambda_{dist} \leq 3,6$$

$$\gamma = 1,1$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{dist}}}$$

σ_{dist} — tensão convencional de flambagem elástica por distorção.



A — área bruta da seção transversal da barra

Valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido submetidas à compressão centrada para dispensar a verificação da flambagem por distorção

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,02	0,03	0,04	0,04	0,08
0,6	0,03	0,04	0,06	0,06	0,15
0,8	0,05	0,06	0,08	0,10	0,22
1,0	0,06	0,07	0,10	0,12	0,27
1,2	0,06	0,07	0,12	0,15	0,27
1,4	0,06	0,08	0,12	0,15	0,27
1,6	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
1,8	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27
2,0	0,07	0,08	0,12	0,15	0,27

**Flambagem por distorção da seção transversal:
flexão simples**

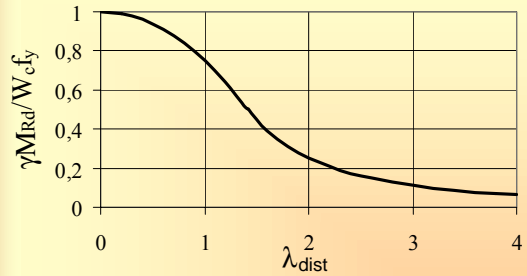
$$M_{Rd} = \frac{W_c \cdot f_y \cdot (1 - 0,25 \cdot \lambda_{dist}^2)}{\gamma} \quad \text{para } \lambda_{dist} < 1,414$$

$$M_{Rd} = \frac{W_c \cdot f_y}{\lambda_{dist}^2 \cdot \gamma} \quad \text{para } \lambda_{dist} \geq 1,414$$

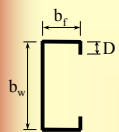
$$\gamma = 1,1$$

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{dist}}}$$

σ_{dist} — tensão convencional de flambagem elástica por distorção.



Para as barras com a mesa tracionada conectada a um painel e a mesa comprimida livre (terças com telhas de aço parafusadas, por exemplo), o valor de cálculo do momento fletor resistente, considerando o efeito da referida contenção lateral, pode ser calculado conforme NBR.



Valores mínimos da relação D/b_w de seções do tipo U enrijecido e Z enrijecido submetidas à flexão para dispensar a verificação da flambagem por distorção.

b_f/b_w	b_w/t				
	250	200	125	100	50
0,4	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,6	0,05	0,06	0,10	0,12	0,25
0,8	0,05	0,06	0,09	0,12	0,22
1,0	0,05	0,06	0,09	0,11	0,22
1,2	0,05	0,06	0,09	0,11	0,20
1,4	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,6	0,05	0,06	0,09	0,10	0,20
1,8	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19
2,0	0,05	0,06	0,09	0,10	0,19

Determinação de deslocamentos

Enrijecedores transversais (força cortante, força concentrada)

Enrugamento

Instabilidade por distorção

Ligações



Momento Fletor

M_{Rk} é o menor dos três valores obtidos, considerando-se os estados limites de flambagem lateral, flambagem local de mesa e flambagem local de alma.

$$\lambda < \lambda_p \rightarrow M_{Rk} = M_{pl}$$

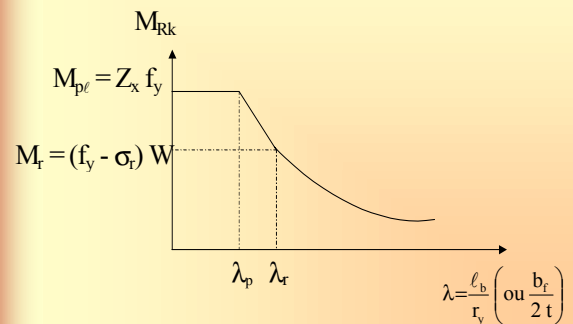
$$\lambda_p \leq \lambda < \lambda_r \rightarrow M_{Rk} = M_{pl} - (M_{pl} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$$

$$\lambda \geq \lambda_r \rightarrow M_{Rk} = M_{cr} \text{ (não aplicável à flambagem local de alma!)}$$

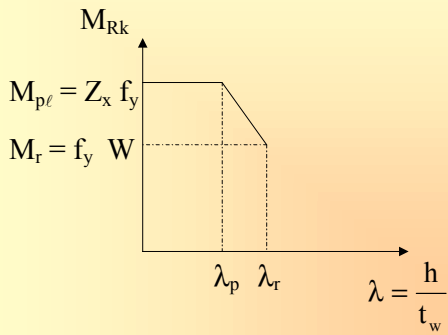
Para perfis com seção transversal em forma de “T” ou “H” com dois eixos de simetria ou “L”, todos fletidos em torno do eixo de maior inércia:

Estados limites aplicáveis	Momento fletor limite de flambagem elástica (M_e)	Momento fletor de flambagem elástica (M_{cr})	Parâmetro de esbelteza (λ)	λ_p	λ_r
FLT	$(f_y - \sigma_r) W$	*	$\frac{\ell_b}{r_y}$	$1,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Valor de λ para o qual $M_{cr} = M_r$
FLM	$(f_y - \sigma_r) W$	Perfis soldados: $\frac{0,38 E}{\lambda^2} W$ Perfis laminados: $\frac{0,67 E}{\lambda^2} W$	$\frac{b_f}{2t}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Perfis soldados: $0,62 \sqrt{\frac{E}{f_y - \sigma_r}}$ Perfis laminados: $0,82 \sqrt{\frac{E}{f_y - \sigma_r}}$
FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	$3,50 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,60 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

FLT / FLM



FLA



$$\sigma_{cr} = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} = \frac{0,9038 \cdot k \cdot E}{\left(\frac{b}{t}\right)^2} \Rightarrow \frac{b}{t} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma_{cr}}}$$

Von Karman: $\frac{b_{ef}}{t} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}$

Winter: $\frac{b_{ef}}{t} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}} \cdot \left(1 - 0,207 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}\right)$

$$\frac{b}{t} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot E}{\sigma}}$$

$k = 0,43 \Rightarrow \frac{b}{t} = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma}} \Rightarrow \frac{b}{t} = 0,62 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y - \sigma_r}}$

$$\sigma_{cr} = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} = \frac{0,9038 \cdot k \cdot E}{\left(\frac{b}{t}\right)^2}$$

$k = 0,43 \Rightarrow \sigma = \frac{0,38 \cdot E}{\left(\frac{b}{t}\right)^2} \Rightarrow M = \frac{0,38 \cdot E \cdot W}{\lambda^2}$

Para perfis com seção transversal em forma de “I” ou “H” com dois eixos de simetria ou “L”, todos fletidos em torno do eixo de maior inércia:

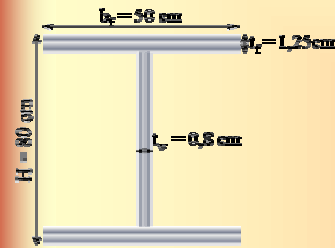
Estados limites aplicáveis	Momento fletor limite de flambagem elástica (M_r)	Momento fletor de flambagem elástica (M_{cr})	Parâmetro de esbelteza (λ)	λ_p	λ_r
FLT	$(f_y - \sigma_r) W$	*	$\frac{\ell_b}{r_y}$	$1,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Valor de λ para o qual $M_{cr} = M_r$
FLM	$(f_y - \sigma_r) W$	Perfis soldados: $\frac{0,38 E}{\lambda^2} W$ Perfis laminados: $\frac{0,67 E}{\lambda^2} W$	$\frac{b_f}{2t}$	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	Perfis soldados: $0,62 \sqrt{\frac{E}{f_y - \sigma_r}}$ Perfis laminados: $0,82 \sqrt{\frac{E}{f_y - \sigma_r}}$
FLA	$f_y W$	-	$\frac{h}{t_w}$	$3,50 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,60 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Estados limites aplicáveis	Momento fletor limite de flamb. elástica (M _{el})	Momento fletor de flamb. elástica (M _{cr})	Parâmetro de esbelteiz (λ)	λ _p		λ _r	
				f _y =25 kN/cm ²	f _y =30 kN/cm ²	f _y =25 kN/cm ²	f _y =30 kN/cm ²
FLM	(f _y - α) W	Perfis sold.: $\frac{0,38E}{\lambda^2} W$ Perfis lamin.: $\frac{0,67E}{\lambda^2} W$	$\frac{b_f}{2t}$	11	10	Perfis sold.: 24 Perfis lamin.: 32	Perfis sold.: 21 Perfis lamin.: 27
FLA	f _y W	-	$\frac{h}{t_w}$	100	91	160	146

Exemplo:

Calcular o valor de cálculo do momento resistente de uma viga de 12m com seção transversal conforme esquema abaixo.

Utilizar f_y = 25 kN/cm².



$$\lambda_{p_{\text{mesa}}} = \frac{25}{1,25} = 20$$

$$\lambda_{p_{\text{alma}}} = \frac{80 - 2,5}{0,8} = 97 \rightarrow \text{ok!}$$

$$I_x = 2 \cdot \left[\frac{b_f \cdot t_f}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_w}{12} \cdot (h - 2 \cdot t_f)^3$$

$$W_x = \frac{I_x}{\left(\frac{h}{2} \right)}$$

$$Z_x = 2 \cdot \left[b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + t_w \cdot \left(\frac{h}{2} - t_f \right)^2 \right]$$

$$I_x = 2 \cdot (8 + 96900) + 31032 = 224847 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 5621 \text{ cm}^3$$

$$Z_x = 2 \cdot (2461 + 600,6) = 6123 \text{ cm}^3$$

$$M_{p\ell} = Z_x \cdot f_y = 6123 \cdot 25 = 153078 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_r = W_x \cdot (f_y - \sigma_r) = 5621 \cdot (25 - 11,5) = 75884 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$M_{Rk} = M_{p\ell} - (M_{p\ell} - M_r) \cdot \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}$$

$$M_{Rk} = 153078 - (153078 - 75884) \cdot \frac{20 - 11}{24 - 11} = 996536 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$

$$\text{FLT} \rightarrow M_{Rd} = 99859 \text{ kN} \cdot \text{cm} \text{ (12 m)}$$

$$\text{FLM} \rightarrow M_{Rd} = \mathbf{88961 \text{ kN} \cdot \text{cm}}$$

$$\text{FLA} \rightarrow M_{Rd} = M_{pLd} = 136677 \text{ kN} \cdot \text{cm}$$