



Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações  
Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

## Dimensionamento de Elementos Estruturais de Aço

Valdir Pignatta e Silva

Julio Fruchtengarten

1 Tração Axial

2 Compressão Axial

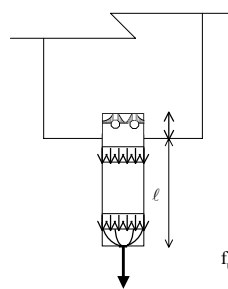
3 Flexão Retas

4 Flexão Composta

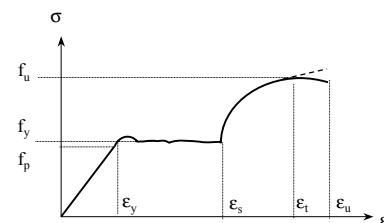
## 1 Tração Axial



### 1 Tração Axial



$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \rightarrow \Delta l = \epsilon l$$



### 1 Tração Axial

#### Estados Limites Últimos (NBR 8800)

Escoamento da Seção Bruta - Peças soldadas ou parafusadas

Força Normal Resistente

$$N_{Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{a,y}}$$

A = área bruta da seção

$$\gamma_{a,y} = 1,12$$

### 1 Tração Axial

#### Estados Limites Últimos (NBR 8800)

Ruptura da Seção Líquida Efetiva - Ligação Parafusada

Força Normal Resistente

$$N_{Rd} = \frac{A_e f_u}{\gamma_{a,u}}$$

$A_e = C_t A_n$  - área efetiva

$A_n$  = área líquida

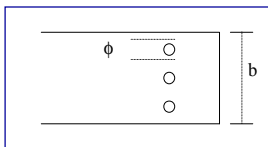
$C_t$  = coeficiente de redução da área líquida efetiva ( $C_t \leq 1$ )

$$\gamma_{a,u} = 1,33$$

### 1 Tração Axial

Cálculo da Área Líquida  $A_n$

$$b_n = b - \sum \phi < 0,85 b$$
$$A_n = b_n t$$

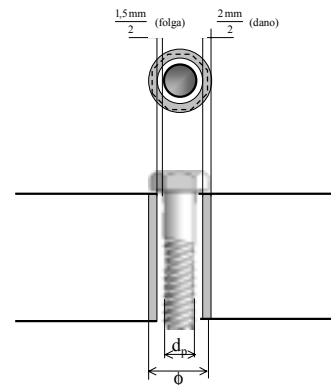


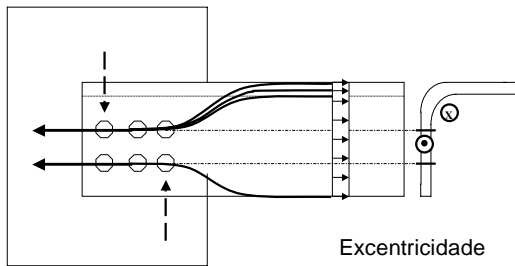
b = Largura da chapa

$b_n$  = Largura líquida da chapa

$d_n$  = Diâmetro do furo ( $d_n + 1,5$  mm)

$\phi$  = Diâmetro nominal do furo ( $\phi = d_n + 2$  mm)





Excentricidade

Elemento conectado	$C_t$
barra conectada por meio de <b>todos os elementos</b> de sua seção	1
perfis "I" e "H", $b_f \geq 2d/3$ , com ligações nas mesas, tendo, no caso de ligações parafusadas, um mínimo de três parafusos por linha de furação na direção da solicitação	0,90
perfis "I" e "H" que não atendam aos requisitos anteriores e <b>todos</b> os demais perfis, tendo, no caso de ligações parafusadas, um <b>mínimo de três parafusos</b> por linha de furação na direção da solicitação	0,85
em <b>todas as barras</b> com ligações parafusadas, tendo <b>somente dois parafusos</b> por linha de furação na direção da solicitação	0,75
<b>chapa</b> com soldas longitudinais ao longo de ambas as bordas	Para $l \geq 2b$ $C_t = 1,0$ Para $2b > l \geq 1,5b$ $C_t = 0,87$ Para $1,5b > l \geq b$ $C_t = 0,75$

l: comprimento de solda  
b: largura da chapa (distância entre soldas)

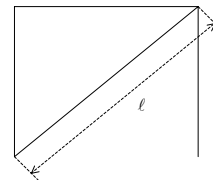
### 1 Tração Axial

#### Estado Limite de Serviço (NBR 8800)

Índice de Esbeltez

$$\lambda = \frac{l}{r} \leq 300$$

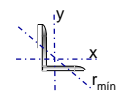
$l$  = comprimento entre travamentos da peça  
 $r$  = raio de giração



Cantoneira de abas iguais

$$\frac{l}{r_{\min}} \leq \frac{c}{r_{\min}}$$

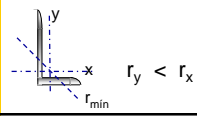
aba paralela



Cantoneira de abas desiguais

$$\frac{l}{r_{\min}} \leq \frac{c}{r_{\min}}$$

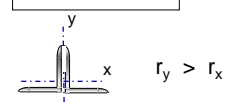
aba paralela

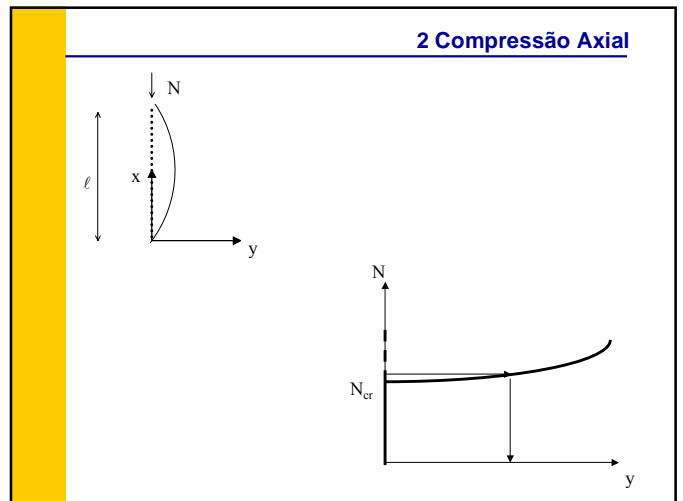
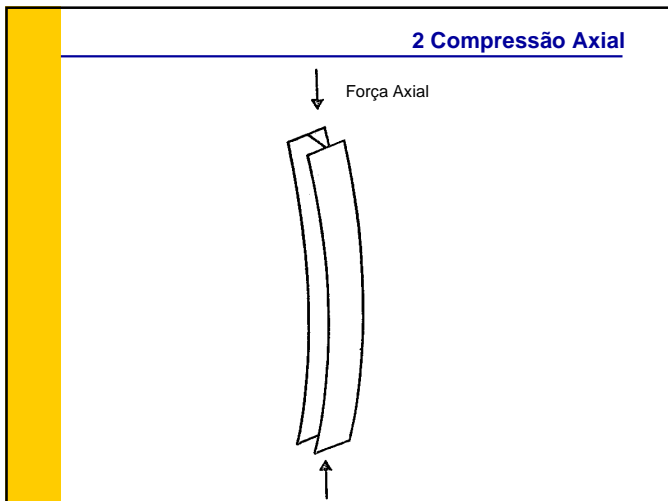
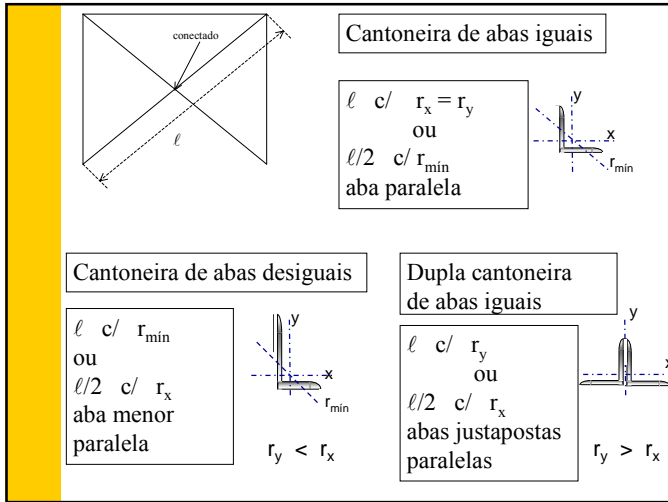


Dupla cantoneira de abas iguais

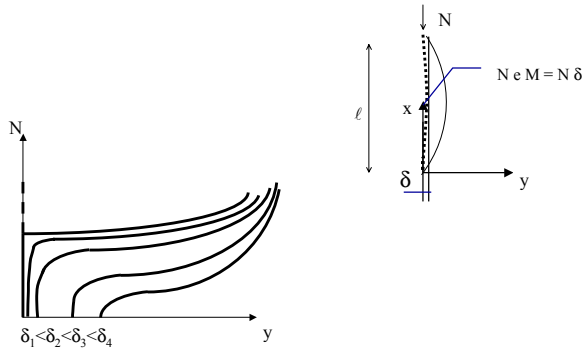
$$\frac{l}{r_x} \leq \frac{c}{r_x}$$

aba paralela





## 2 Compressão Axial

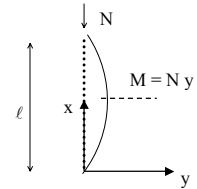


## 2 Compressão Axial

### Cálculo da Carga Crítica - Processo de Equilíbrio

#### PILAR IDEAL - Características:

- Material homogêneo (sem tensões residuais)
- Material elástico-linear
- Peça sem imperfeições geométricas
- Extremidades articuladas
- Carga axial
- Não ocorre flambagem local ou flambagem por torção



## 2 Compressão Axial

### Cálculo da Carga Crítica - Processo de Equilíbrio

$$y'' = -\frac{M}{EI} = -\frac{N y}{EI} \quad \text{ou} \quad y'' + \frac{N}{EI} y = 0$$

$$k^2 = \frac{N}{EI} \quad \rightarrow \quad y'' + k^2 y = 0$$

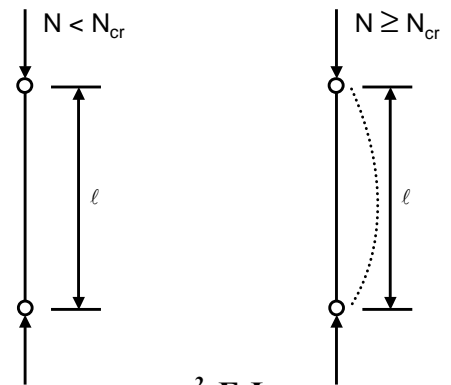
Solução Geral:  $y = C_1 \sin(kx) + C_2 \cos(kx)$

Condições de Contorno:  
 $x=0, y=0 \Rightarrow C_2 = 0$   
 $x=l, y=0 \Rightarrow \sin(kl) = 0$

$$\Rightarrow kl = n\pi$$

$$k^2 = \frac{N}{EI} = \frac{n^2 \pi^2}{l^2}$$

Para  $n=1 \Rightarrow N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$



$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{l_{fl}^2}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{(k\ell)^2}$$

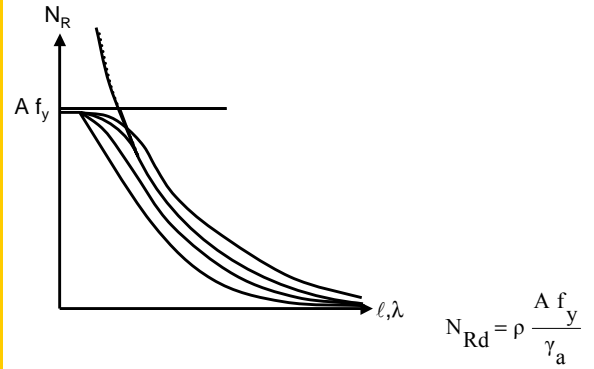
$$\lambda = \frac{k\ell}{r}$$

Índice de Esbeltez

$\ell_{fl} = k \ell$  - comprimento de flambagem, igual ao comprimento de uma barra biarticulada de mesma carga crítica

## 2 Compressão Axial

A linha tracejada indica a configuração pós-crítica						
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados para o dimensionamento	0,65	0,80	1,2	1,0	2,1	2,0



## 2 Compressão Axial

### Estado Limite Último (NBR 8800)

Força Normal Resistente

$$N_{Rd} = \frac{\rho A_g f_y}{\gamma_a}$$

$A_g$  - área bruta  
 $\rho = \rho(\lambda_0)$  - coeficiente redutor da resistência

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}}}$$

$$\gamma_a = 1,12$$

(quando a flambagem local não for condicionante)

## 2 Compressão Axial

Valores de  $\rho$   $\Rightarrow$

$$\rho = 1,0 \quad \text{para } 0 \leq \lambda_0 \leq 0,20$$

$$\rho = \beta \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\lambda_0^2}} \quad \text{para } \lambda_0 > 0,20$$

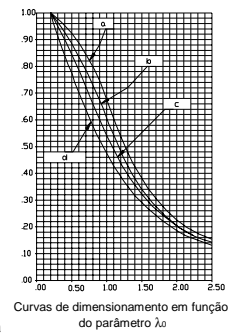
Onde:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}}}$$

$$\beta = \frac{1}{2 \lambda_0^2} \left[ 1 + \alpha \sqrt{\lambda_0^2 - 0,04 + \lambda_0^2} \right]$$

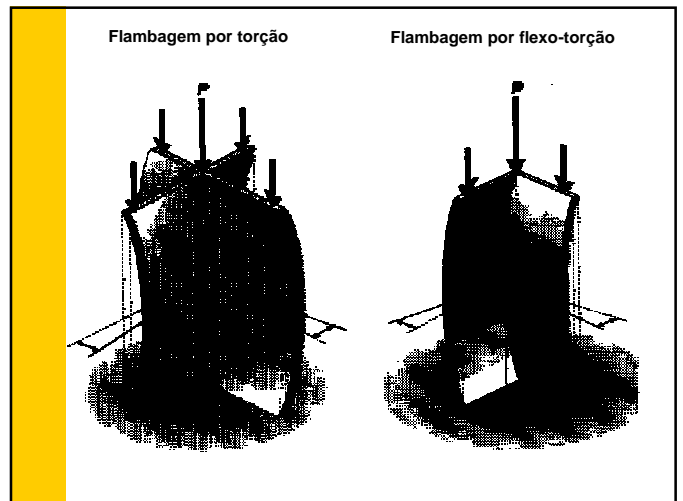
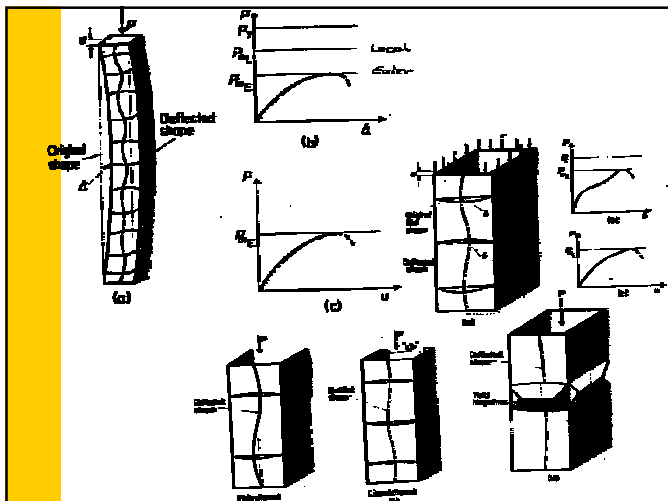
Valores de  $\alpha$   $\Rightarrow$

- $\alpha = 0,158$  para a curva a
- $\alpha = 0,281$  para a curva b
- $\alpha = 0,384$  para a curva c
- $\alpha = 0,572$  para a curva d

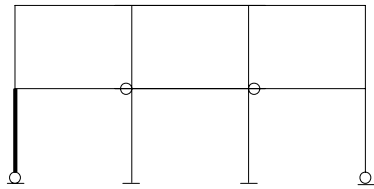


Cargas universais		Flambagem	Curva de	
		em torno do eixo	Flambagem	
		de eixo	(k)	
		X-X	0	
		Y-Y	0	
	Cargas de grande momento $M \geq 30$ $d \geq 30$	X-X	0	
		Y-Y	0	
	Outros casos		X-X	0
			Y-Y	0
	$d \leq 1,2$ $40mm$	X-X	0	
		Y-Y	$k \cdot 0,9$	
	$d \leq 1,2$ $40mm$	X-X	$k \cdot 0,9$	
		Y-Y	$k \cdot 0,9$	
	$1,2 < d < 1,5$ $40mm$		X-X	0
			Y-Y	0
	$1,5 < d < 1,8$ $40mm$	X-X	0	
		Y-Y	0	
	$1,8 < d < 2,0$ $40mm$	X-X	0	
		Y-Y	0	
		X-X	0	
		Y-Y	0	

k	Curva c									
	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,19
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1,2	1,000	0,995	0,990	0,985	0,980	0,975	0,970	0,965	0,960	0,955
1,3	0,981	0,976	0,971	0,966	0,961	0,956	0,951	0,946	0,941	0,936
1,4	0,960	0,955	0,950	0,945	0,940	0,935	0,930	0,925	0,920	0,915
1,5	0,938	0,933	0,928	0,923	0,918	0,913	0,908	0,903	0,898	0,893
1,6	0,915	0,910	0,905	0,900	0,895	0,890	0,885	0,880	0,875	0,870
1,7	0,892	0,887	0,882	0,877	0,872	0,867	0,862	0,857	0,852	0,847
1,8	0,869	0,864	0,859	0,854	0,849	0,844	0,839	0,834	0,829	0,824
1,9	0,846	0,841	0,836	0,831	0,826	0,821	0,816	0,811	0,806	0,801
2,0	0,823	0,818	0,813	0,808	0,803	0,798	0,793	0,788	0,783	0,778
2,1	0,800	0,795	0,790	0,785	0,780	0,775	0,770	0,765	0,760	0,755
2,2	0,777	0,772	0,767	0,762	0,757	0,752	0,747	0,742	0,737	0,732
2,3	0,754	0,749	0,744	0,739	0,734	0,729	0,724	0,719	0,714	0,709
2,4	0,731	0,726	0,721	0,716	0,711	0,706	0,701	0,696	0,691	0,686
2,5	0,708	0,703	0,698	0,693	0,688	0,683	0,678	0,673	0,668	0,663
2,6	0,685	0,680	0,675	0,670	0,665	0,660	0,655	0,650	0,645	0,640
2,7	0,662	0,657	0,652	0,647	0,642	0,637	0,632	0,627	0,622	0,617
2,8	0,639	0,634	0,629	0,624	0,619	0,614	0,609	0,604	0,599	0,594
2,9	0,616	0,611	0,606	0,601	0,596	0,591	0,586	0,581	0,576	0,571
3,0	0,593	0,588	0,583	0,578	0,573	0,568	0,563	0,558	0,553	0,548
3,1	0,570	0,565	0,560	0,555	0,550	0,545	0,540	0,535	0,530	0,525
3,2	0,547	0,542	0,537	0,532	0,527	0,522	0,517	0,512	0,507	0,502
3,3	0,524	0,519	0,514	0,509	0,504	0,499	0,494	0,489	0,484	0,479
3,4	0,501	0,496	0,491	0,486	0,481	0,476	0,471	0,466	0,461	0,456
3,5	0,478	0,473	0,468	0,463	0,458	0,453	0,448	0,443	0,438	0,433
3,6	0,455	0,450	0,445	0,440	0,435	0,430	0,425	0,420	0,415	0,410
3,7	0,432	0,427	0,422	0,417	0,412	0,407	0,402	0,397	0,392	0,387
3,8	0,409	0,404	0,399	0,394	0,389	0,384	0,379	0,374	0,369	0,364
3,9	0,386	0,381	0,376	0,371	0,366	0,361	0,356	0,351	0,346	0,341
4,0	0,363	0,358	0,353	0,348	0,343	0,338	0,333	0,328	0,323	0,318
4,1	0,340	0,335	0,330	0,325	0,320	0,315	0,310	0,305	0,300	0,295
4,2	0,317	0,312	0,307	0,302	0,297	0,292	0,287	0,282	0,277	0,272
4,3	0,294	0,289	0,284	0,279	0,274	0,269	0,264	0,259	0,254	0,249
4,4	0,271	0,266	0,261	0,256	0,251	0,246	0,241	0,236	0,231	0,226
4,5	0,248	0,243	0,238	0,233	0,228	0,223	0,218	0,213	0,208	0,203
4,6	0,225	0,220	0,215	0,210	0,205	0,200	0,195	0,190	0,185	0,180
4,7	0,202	0,197	0,192	0,187	0,182	0,177	0,172	0,167	0,162	0,157
4,8	0,179	0,174	0,169	0,164	0,159	0,154	0,149	0,144	0,139	0,134
4,9	0,156	0,151	0,146	0,141	0,136	0,131	0,126	0,121	0,116	0,111
5,0	0,133	0,128	0,123	0,118	0,113	0,108	0,103	0,098	0,093	0,088







$$l_{fl} = ?$$

$$K = ?$$

### Hipóteses

- Estrutura simétrica
- Pórticos retangulares
- Comportamento elástico
- Vigas e pilares ligados rigidamente
- Carregamento simétrico.  
Todos pilares atingem  $N_{cr}$  simultaneamente
- Elementos de seção constante

Associa-se a cada nó, grandezas  $G_A$  e  $G_B$

$$G = \frac{\sum \frac{I_p}{L_p}}{\sum \alpha \frac{I_g}{L_g}}$$

Relação entre rigidezes das vigas e pilares que concorrem no nó

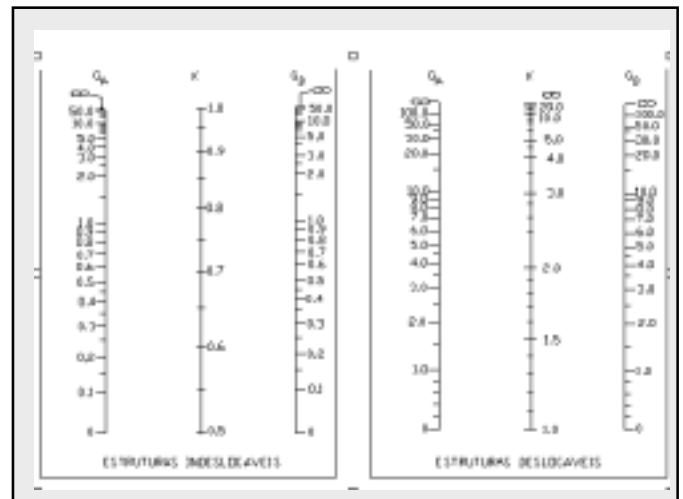
Pilar engastado no nó:  $G = 0$ . Recomenda-se  $G = 1$

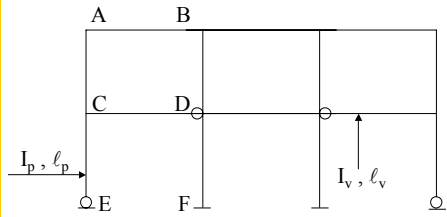
Pilar articulado no nó:  $G \rightarrow \infty$ . Permite-se  $G = 10$

Para estruturas deslocáveis:

$\alpha = 0,50$  quando outra extremidade for rotulada

$\alpha = 0,67$  quando outra extremidade for engastada





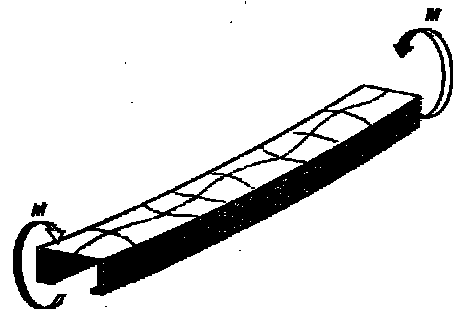
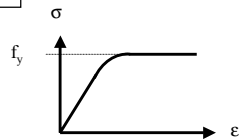
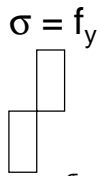
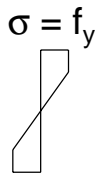
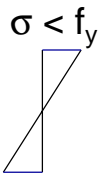
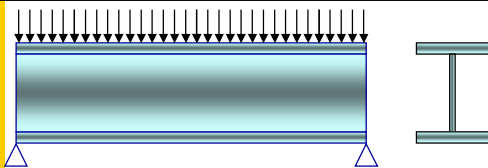
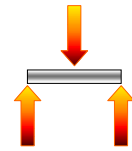
$$G_D = \frac{2 I_p / l_p}{I_v / l_v}$$

$$G_F = 1$$

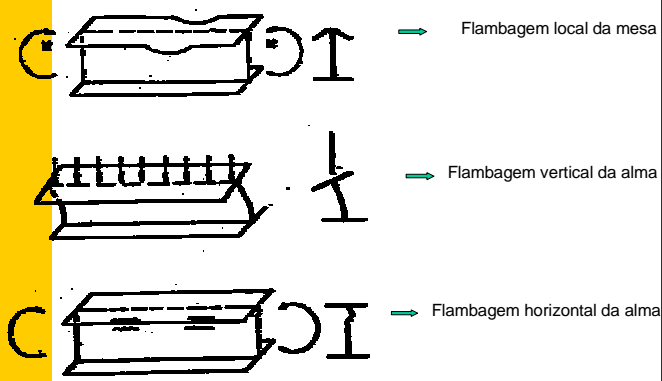
$$G_D = \frac{I_p / l_p}{2 I_v / l_v}$$

$$G_E = 10$$

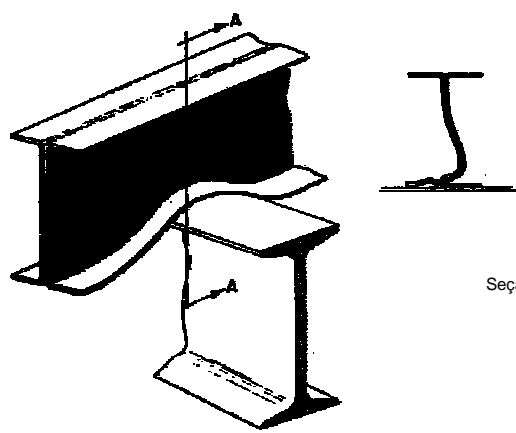
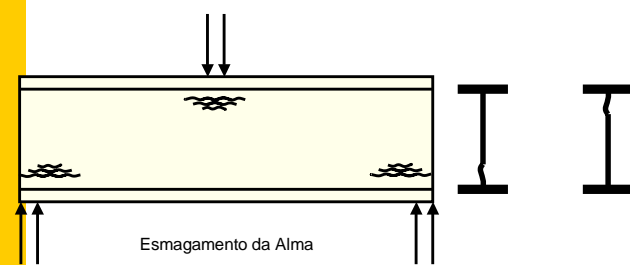
### 3 Flexão Simples



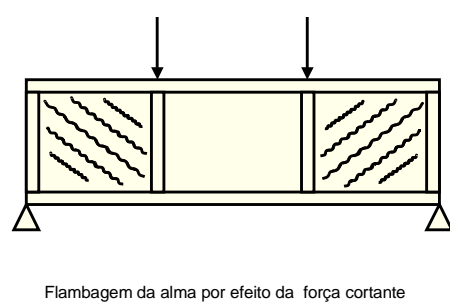
### Flambagem local das chapas componentes do perfil

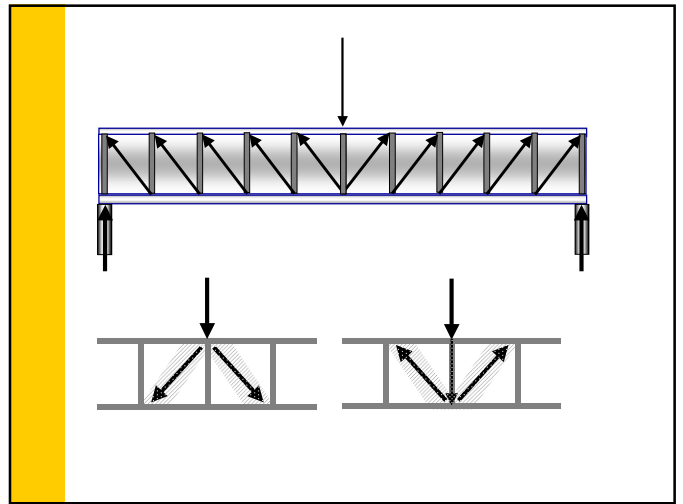
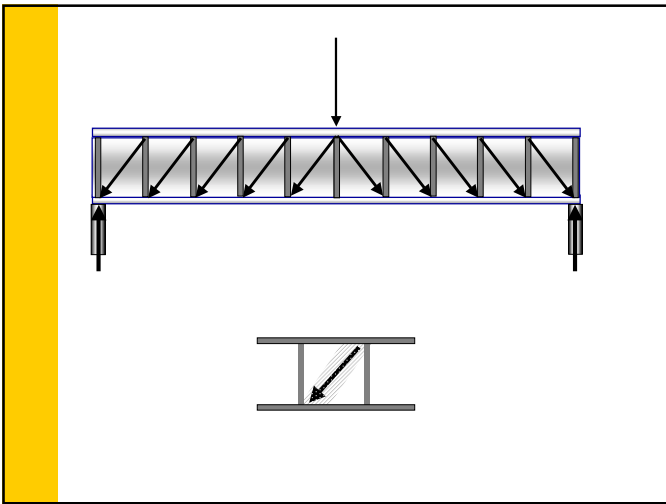
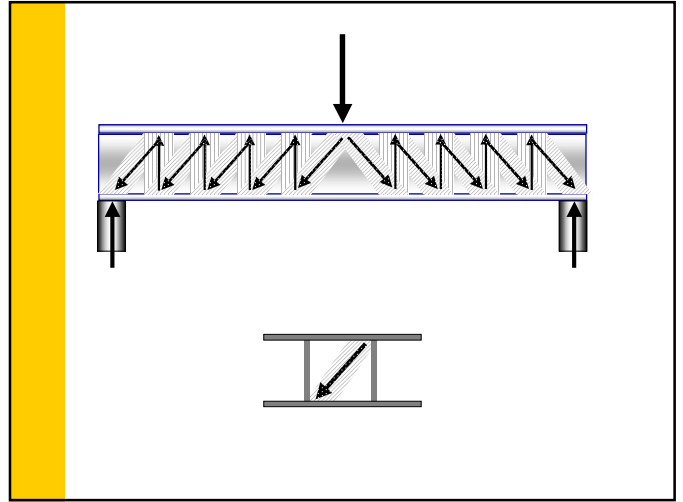
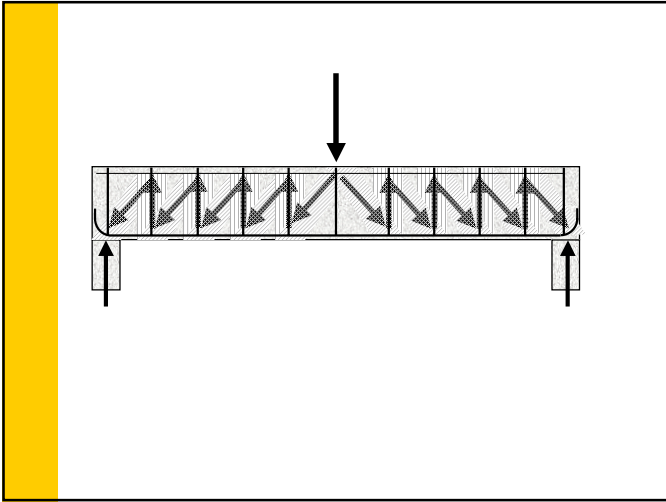


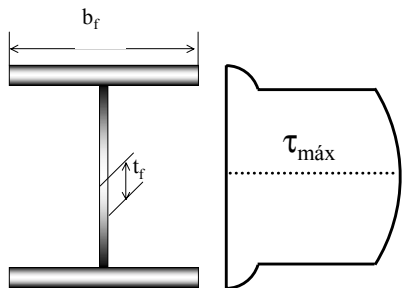
### Flambagem Local das chapas componentes do perfil



### Flambagem local das chapas componentes do perfil







$$\tau = \frac{V S}{b I_x}$$

$$\tau = \frac{V S}{b I_x}$$

Desprezando-se a contribuição da alma para cálculo do S e I:

$$S_0 \cong b_f t_f \frac{h}{2}$$

$$I_x = 2(b_f t_f) \left(\frac{h}{2}\right)^2$$

$$b = t_w$$

$$\tau = \frac{V}{h t_w} = \frac{V}{A_w}$$

Segundo o critério de Von Mises:  $\tau_p = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cong 0,6 f_y$

$$V_p = 0,6 A_w f_y$$

$$V_{Rd} = \frac{0,6 A_w f_y}{\gamma_a}$$

### 3 Flexão Simples

Estado Limite Último - Força Cortante (NBR 8800)

$$V_{Rk} = V_{pl} \quad \text{para } \lambda \leq \lambda_p$$

$$V_{Rk} = \frac{\lambda_p}{\lambda} V_{pl} \quad \text{para } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$V_{Rk} = 1,28 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda}\right)^2 V_{pl} \quad \text{para } \lambda > \lambda_r$$

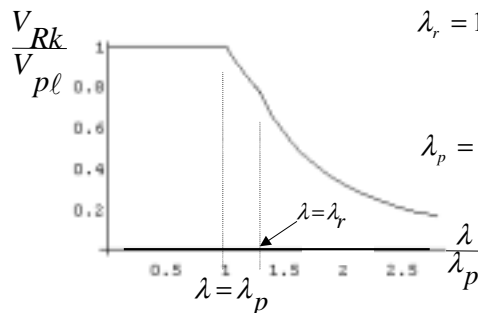
### 3 Flexão Simples

$$V_{pl} = 0,6 f_y A_w$$

$$\lambda = \frac{h}{t_w}$$

$$\lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}}$$

$$\lambda_p = 1,08 \sqrt{\frac{E k_v}{f_y}}$$



### 3 Flexão Simples

**Força Cortante** - simplificação para vigas usuais

Força cortante resistente

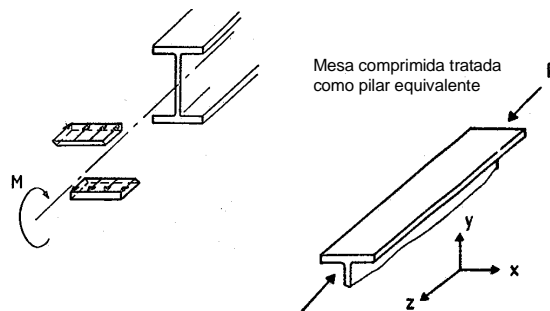
$$V_{Rd} = \frac{0,6 A_w f_y}{\gamma_a}$$

$$\gamma_a = 1,12$$

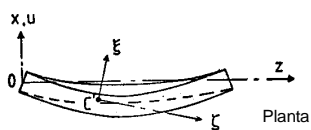
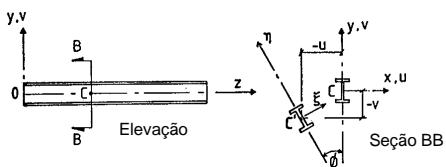
### 3 Flexão Simples

#### Momento Fletor e Flambagem Lateral

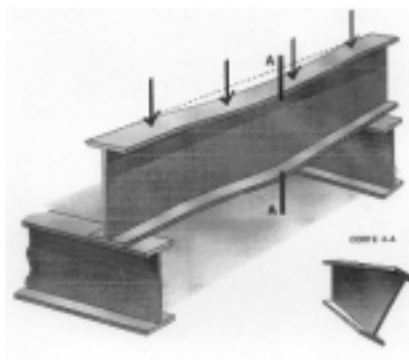
Distribuição de tensões nas mesas, devido à flexão



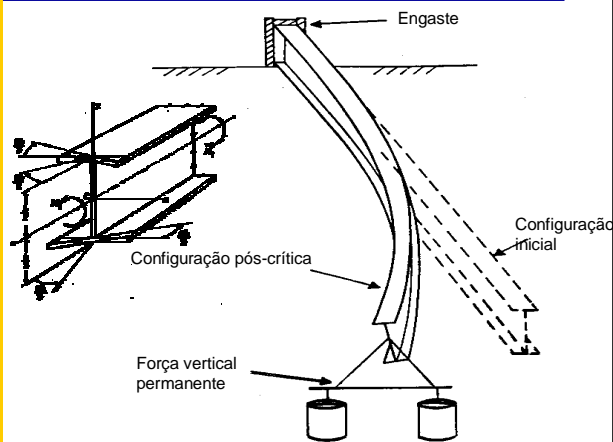
### 3 Flexão Simples



### 3 Flexão Simples



### 3 Flexão Simples



### 3 Flexão Simples

#### Momento Fletor e Flambagem Lateral

Flexão em torno de "Y"  
Torção  
Empenamento  
Flexão adicional em torno de "X"

$M_{cr}$  depende de:

- Rigidez à flexão em torno do eixo y
- Rigidez ao empenamento
- Rigidez à torção
- Diagrama de momentos
- Contenção lateral da viga (distância entre os pontos travados)

### 3 Flexão Simples

O valor de  $M_{cr}$  é tal que:

- $M < M_{cr} \Rightarrow$  Apenas deslocamentos verticais
- $M \geq M_{cr} \Rightarrow$  Flambagem lateral

#### Momento Fletor e Flambagem Lateral - Hipóteses

- Viga inicialmente reta
- Barras prismáticas com um eixo de simetria longitudinal
- Carga passa pelo centro de torção
- Não é preciso superpor os efeitos de V e M
- Não ocorre instabilidade local dos elementos componentes

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y \ell)^2} \left[ (C_p a + C_k k) + \sqrt{(C_p a + C_k k)^2 + \frac{C_w}{I_y} \left( 1 + \frac{G I_t}{E C_w} \frac{(K_y \ell)^2}{\pi^2} \right)} \right]$$

(regime elástico-linear)

$E I_y$  – rigidez à flexão em torno de "Y"  
 $E I_t$  – rigidez à torção  
 $E C_w$  – rigidez ao empenamento  
 $K_y$  – condição de vínculo no plano de flambagem  
 $C_b$  – fator de equivalência de momentos fletores  
 Momento fletor constante – compressão constante na mesa  
 Momento fletor variável – compressão variável na mesa  
 $C_p$  a – efeito da posição da carga (a = 0 – centro de torção)  
 $C_k$  k – efeito da assimetria da seção (k = 0 – seção duplamente simétrica)  
 $\ell$  – distância entre travamentos (torção e deslocamento lateral impedidos)

hipóteses simplificadoras

apoio simples no plano de flambagem –  $K_y=1$   
 seção duplamente simétrica –  $k=0$   
 carregamento no centro de torção –  $a=0$

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi^2 E I_y}{\ell^2} \left[ \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left( 1 + \frac{G I_t \ell^2}{E C_w \pi^2} \right)} \right]$$

simplificações geométricas:

$$I_y = 2 \frac{t_f b^3}{12} \quad I_x = 2 b_f t_f \left( \frac{d}{2} \right)^2$$

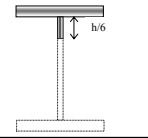
$$C_w = I_y \left( \frac{d}{2} \right)^2 \quad W_x = \frac{I_x}{d/2} = A_f d$$

$$M_{cr} = C_b \sqrt{(M_{cr1})^2 + (M_{cr2})^2}$$

$$M_{cr1} = 0,65 \frac{E W_x}{\ell b A_f}$$

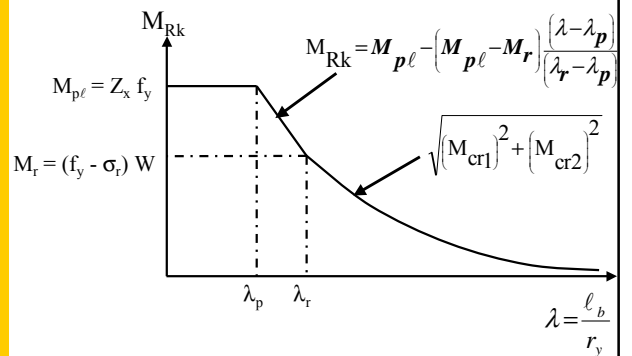
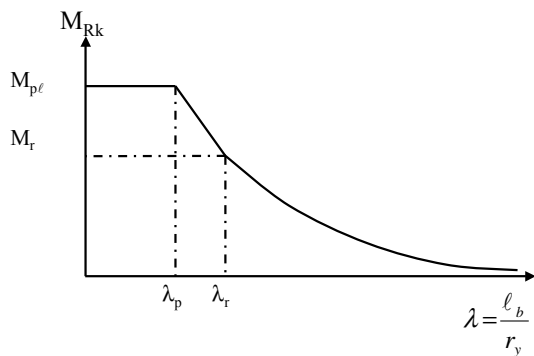
$$M_{cr2} = \pi^2 \frac{E W_x}{\left( \frac{\ell b}{t_f} \right)^2}$$

$$r_t = \sqrt{\frac{I_y/2}{A_f + \frac{A_w}{6}}}$$



$\ell$  - distância entre travamentos

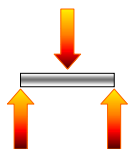
### Flexão Simples





### 3 Flexão Simples

#### Estado Limite Último – Momento Fletor (NBR 8800)



$M_{Rk}$  = Valor característico do momento fletor resistente  
(flambagem local não é condicionante)  
 $\gamma_a = 1,12$

Momento Fletor Resistente

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma_a}$$

(perfis I)

$$\lambda < \lambda_p \quad M_{Rk} = M_{p\ell}$$

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

$$\lambda > \lambda_r \quad M_{Rk} = M_{cr} = C_b \sqrt{M_{cr1}^2 + M_{cr2}^2}$$

(perfis [ )

$$\lambda > \lambda_r \quad M_{Rk} = M_{cr} = C_b M_{cr1}$$

### 3 Flexão Simples

Onde:

$$M_{p\ell} = Z_x f_y$$

$$M_r = W_x (f_y - \sigma_r) \quad \sigma_r = 7 \text{ kN/cm}^2$$

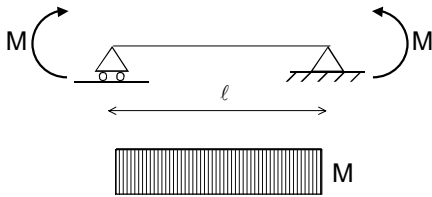
$$\text{(perfis I e [ )} \quad \lambda_p = 1,75 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\text{(perfis I)} \quad \lambda_r = \frac{19,9 r_t^2 \frac{d}{A_f} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \chi^2}}}{\chi r_y}$$

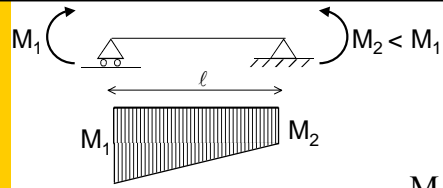
$$\chi = \frac{40,75}{E C_b} (f_y - \sigma_r) \left( r_t \frac{d}{A_f} \right)^2$$

$$\text{(perfis [ )} \quad \lambda_r = \frac{0,65 E C_b}{(f_y - \sigma_r) r_y \frac{d}{A_f}}$$

$$M_{cr}^* = \sqrt{M_{cr1}^2 + M_{cr2}^2}$$

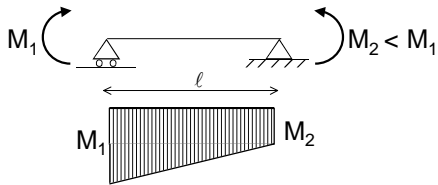
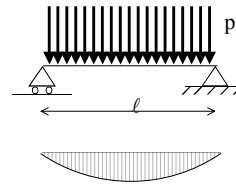


$$M_{cr} = M_{cr}^*$$



$$M_{cr} = C_b M_{cr}^*$$

$$C_b \geq 1$$

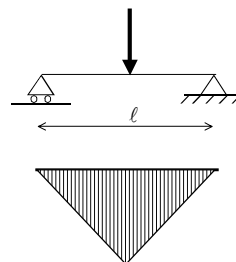


Em barras sem carregamento transversal **entre travamentos**:

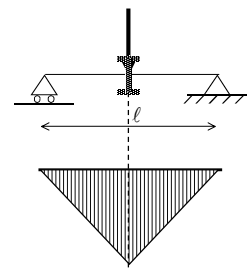
$$C_b = 1,75 - 1,05 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^2, \quad |M_1| \leq |M_2|$$

Em barras com carregamento transversal e momento no vão maior do que momentos nas extremidades:

$$C_b = 1$$

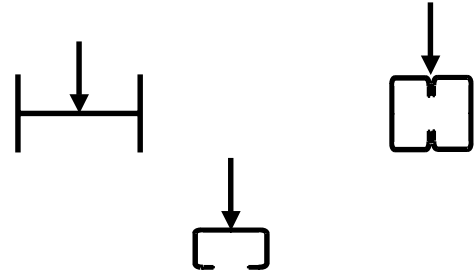
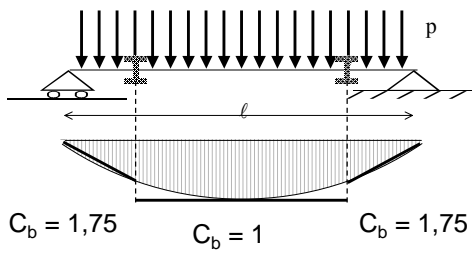


$$C_b = 1$$



$$C_b = 1,75$$

$$C_b = 1,75 - 1,05 \left( \frac{M_1}{M_2} \right) + 0,3 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^2, \quad |M_1| \leq |M_2|$$

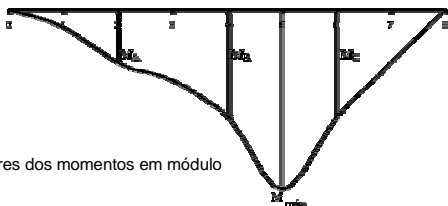


Não há flambagem lateral

### 3 Flexão Simples

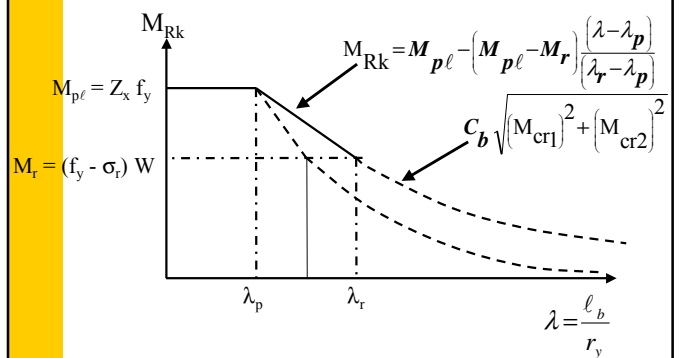
$C_b$  - coeficiente de equivalência de momento na flexão

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



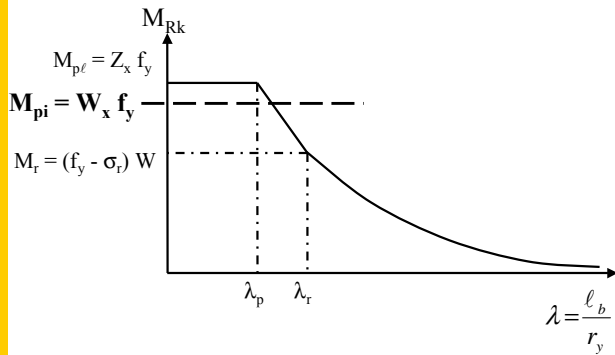
Valores dos momentos em módulo

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

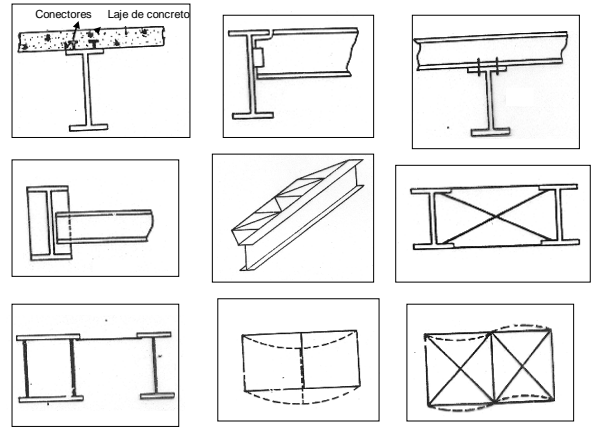


É prática usual não se verificar a flambagem local quando se utiliza os perfis da tabela e  $M_{Rk} \leq M_{pi}$

$$M_{pi} = W_x f_y$$



### Contenção Lateral



### 3 Flexão Simples

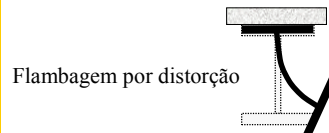
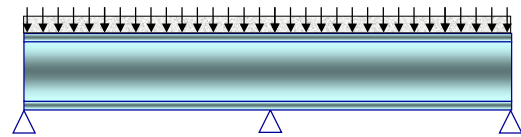
#### Estados Limites de Serviço - Verificação das Flechas

As flechas verticais devem atender:

$$\Delta_{m\acute{a}x} < \Delta_{lim}$$

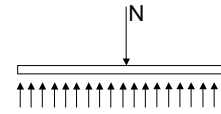
Valores limites para as flechas ( $\Delta_{lim}$ ) recomendados pela NBR 8800, considerando-se apenas a sobrecarga:

- Vigas principais de piso e vigas de cobertura em edifícios industriais:  $\frac{\ell}{360}$
- Terças para materiais de cobertura flexíveis (aço, alumínio, etc.):  $\frac{\ell}{180}$
- Terças para materiais de cobertura não-flexíveis:  $\frac{\ell}{240}$

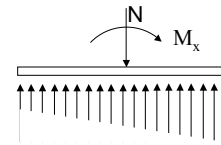


Flambagem por distorção

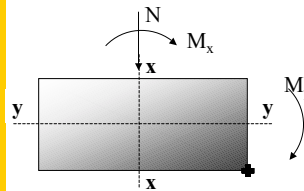
## 4 Flexão Composta



$$\frac{N}{A} \leq f_y$$



$$\frac{N}{A} + \frac{M_x}{Z_x} \leq f_y$$

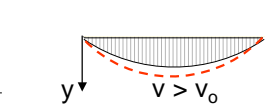
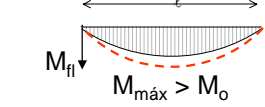
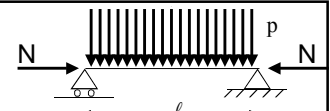
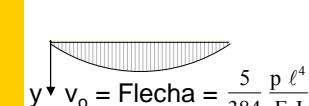
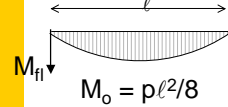
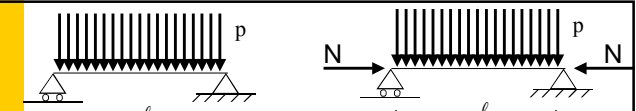


$$\frac{N}{A} + \frac{M_x}{Z_x} + \frac{M_y}{Z_y} \leq f_y$$

$$\frac{N}{A} + \frac{M_x}{Z_x} + \frac{M_y}{Z_y} \leq f_y$$

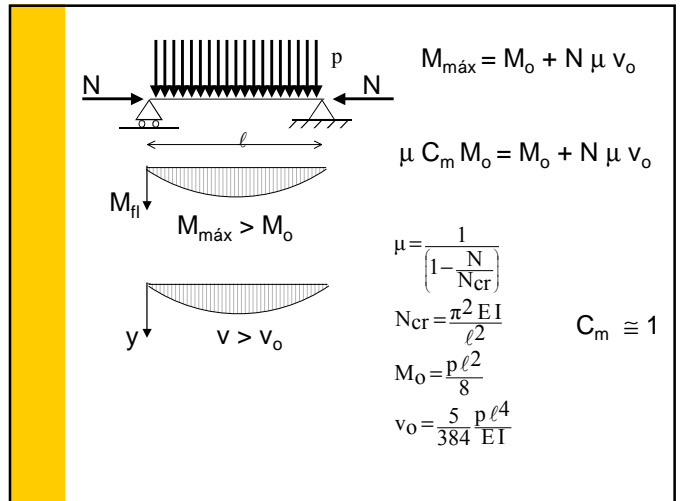
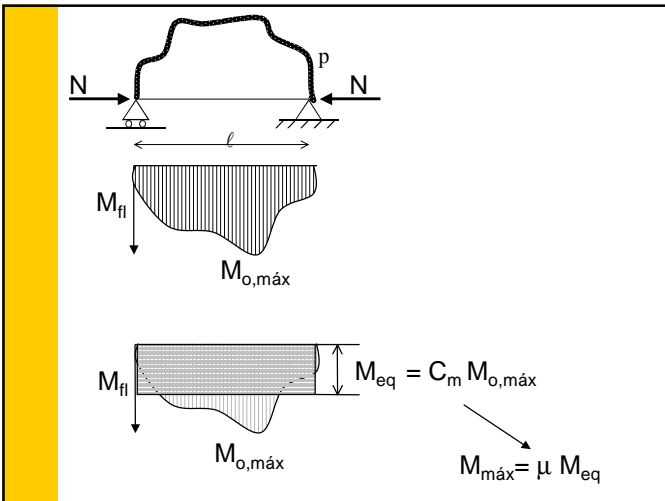
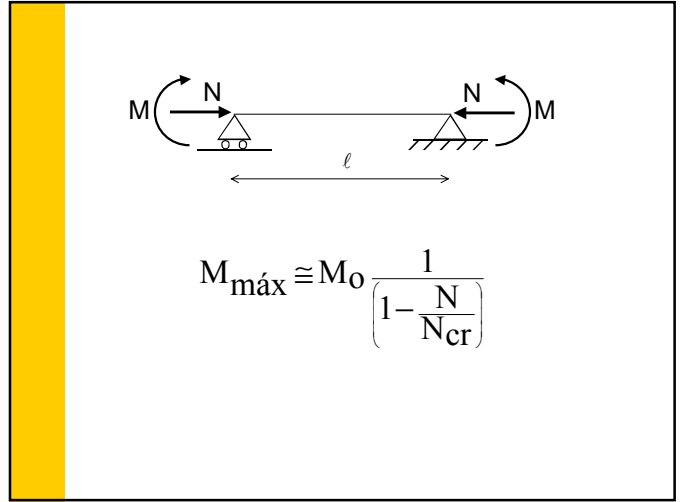
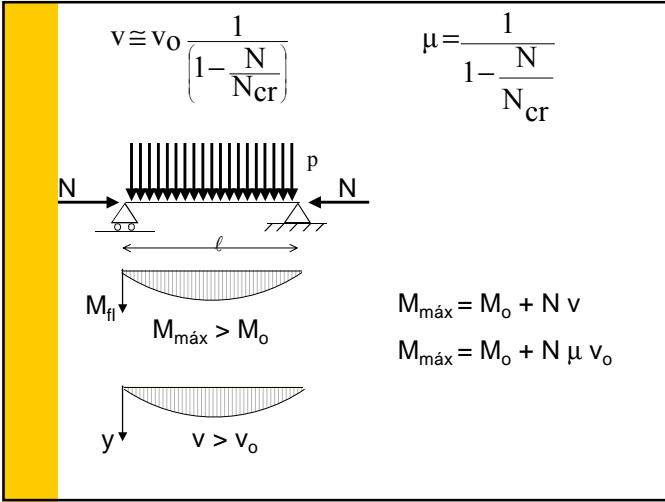
$$\frac{N}{A f_y} + \frac{M_x}{Z_x f_y} + \frac{M_y}{Z_y f_y} \leq 1$$

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



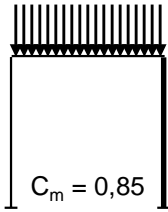
$$M_{\text{máx}} = M_o + N v$$

$$v \cong v_o \left( 1 - \frac{N}{N_{cr}} \right)$$

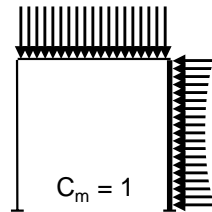


## Nós deslocáveis

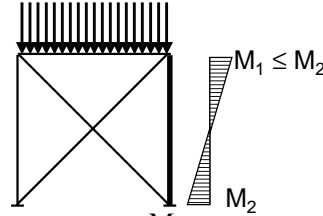
Sem carregamento transversal



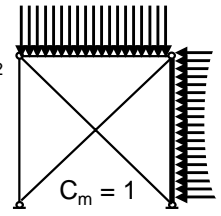
Com carregamento transversal



Sem carregamento transversal

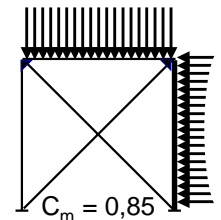


Com carregamento transversal



$$C_m = 0,6 + 0,4 \frac{M_1}{M_2} \geq 0,4$$

## Nós indeslocáveis



### 4 Flexão Composta

#### Expressões de Interação (NBR 8800)

Capacidade resistente da seção mais solicitada

$$\frac{N_{Sd}}{N_{y,Rd}} + \frac{M_{x,Sd}}{M_{x,Rd}} + \frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (1)$$

$$N_{y,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{1,12}$$

$N_{Sd}, M_{x,Sd}, M_{y,Sd}$  - Valores de cálculo dos esforços solicitantes na seção

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$  - Valores de cálculo dos momentos resistentes levando-se em conta o efeito da flambagem lateral, com  $C_b = 1$

### 4 Flexão Composta

Estabilidade da barra

$$\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{C_{mx} \cdot M_{x,Sd}}{M_{x,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{0,73 \cdot N_{xe}} \right)} + \frac{C_{my} \cdot M_{y,Sd}}{M_{y,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{0,73 \cdot N_{ye}} \right)} \leq 1$$

$$N_{Rd} = \frac{\rho \cdot A \cdot f_y}{1,12}$$

(2)

$N_{Sd}, M_{x,Sd}, M_{y,Sd}$  - Valores de cálculo dos esforços solicitantes na seção

$M_{x,Rd}, M_{y,Rd}$  - Valores de cálculo dos momentos resistentes calculados levando-se em conta o efeito da flambagem lateral, com  $C_b = 1$

#### 4 Flexão Composta

$$N_{xe} = \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{x0}^2} \quad \lambda_{x0} = \frac{\lambda_x}{\sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}}}$$

ou

$$N_{xe} = \frac{\pi^2 E I_x}{\ell_{fl,x}^2}$$

$$N_{ye} = \frac{A \cdot f_y}{\lambda_{y0}^2} \quad \lambda_{y0} = \frac{\lambda_y}{\sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y}}}$$

ou

$$N_{ye} = \frac{\pi^2 E I_y}{\ell_{fl,y}^2}$$

- Para flexão oblíqua pode-se utilizar (1) e (2) com  $N_{sd} = 0$ .
- Para flexo-compressão reta (flexão em um só plano) pode-se utilizar (1) e (2) com um dos  $M_{sd} = 0$
- Para flexo tração basta verificar (1)
- Na utilização das expressões de interação,  $C_b = 1$
- Para  $C_m = 1$ , basta verificar (2)
- Se (1) não for cumprida não há necessidade de calcular (2)
- O  $N_e$  utilizado na amplificação de momentos é o do plano da flambagem e não o menor entre  $N_{xe}$  e  $N_{ye}$
- Para o  $N_{Rd}$  e, (2) deve-se utilizar o menor  $\rho$ , independente do plano de flexão.