Universidade POSITIVO

Sistemas Estruturais I – Aula 05a
Flambagem Local em Peças de Aço Comprimidas

- Flambagem Local
- Dimensionamento conforme a Norma (Com Flambagem Local)

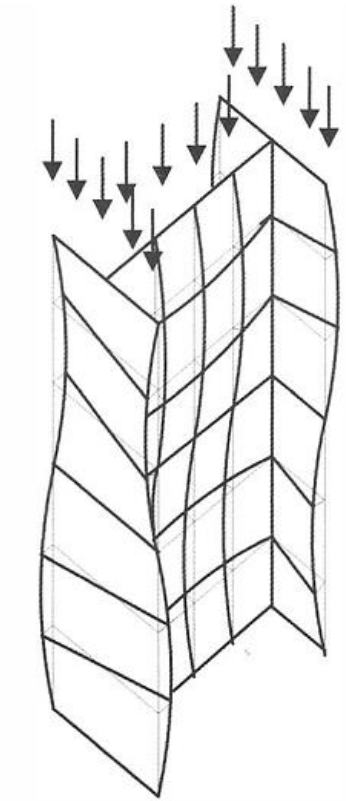
Prof. Juliano J. Scremin

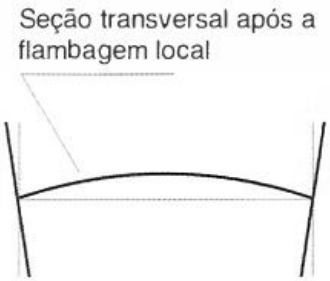
Universidade POSITIVO

Aula 05a - Seção 1: Flambagem Local

Flambagem Local (1)

- Denomina-se **flambagem local a flambagem das placas componentes** de um perfil comprimido.
- A figura ao lado mostra uma coluna curta (que não sofre flambagem global por flexão) porém cujas placas apresentam deslocamentos laterais na forma de ondulações (flambagem local).
- A flambagem local influencia na flambagem global agravando-a, porém o efeito inverso normalmente é desconsiderado no procedimento de cálculo.
- Tal como na flambagem global, a flambagem local também reduz a capacidade da peça resistir a compressão

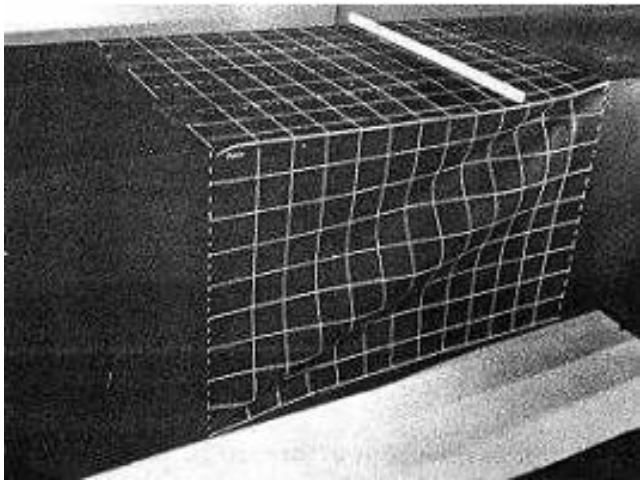




Flambagem Local (2)

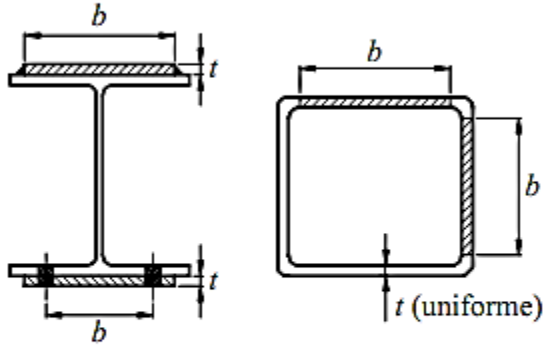
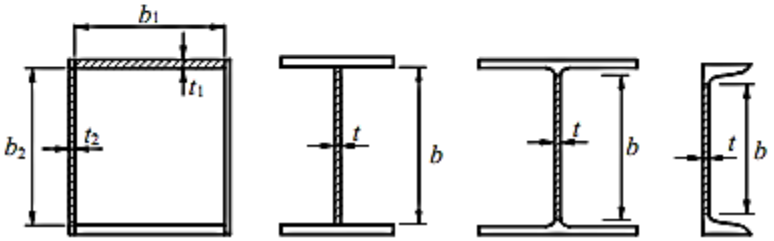




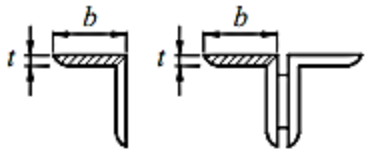
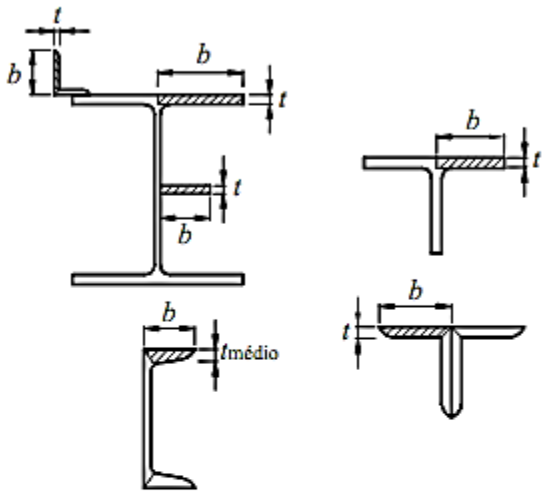
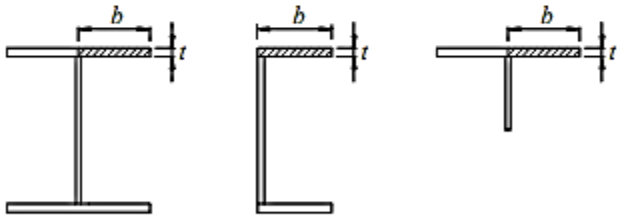
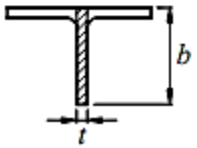


Limites para não ocorrência de Flambagem Local (1)

- O que define a não ocorrência da flambagem local é a relação entre b/t, a saber :
  - b o comprimento livre de uma chapa;
  - t espessura da chapa;
  AA – componentes enrijecidos;

Elementos	Grupo	Descrição dos elementos	Alguns exemplos com indicação de b e t	$(b/t)_{lim}$
AA	1	— Mesas ou almas de seções tubulares retangulares — Lamelas e chapas de diafragmas entre linhas de parafusos ou soldas		$1{,}40\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	2	— Almas de seções I, H ou U — Mesas ou almas de seção-caixão — Todos os demais elementos que não integram o Grupo 1		$1{,}49\sqrt{\frac{E}{f_y}}$

Limites para não ocorrência de Flambagem Local (2)

AL	3	— Abas de cantoneiras simples ou múltiplas providas de chapas de travejamento		$0,45\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	4	— Mesas de seções I, H, T ou U laminadas — Abas de cantoneiras ligadas continuamente ou projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas — Chapas projetadas de seções I, H, T ou U laminadas ou soldadas		$0,56\sqrt{\frac{E}{f_y}}$
	5	— Mesas de seções I, H, T ou U soldadas [a]		$0,64\sqrt{\frac{E}{(f_y / k_c)}}$
	6	— Almas de seções T		$0,75\sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}$, sendo $0,35 \le k_c \le 0,76$

kc – coeficiente que considera a influência da esbeltez da alma na rigidez à rotação

Universidade POSITIVO

Aula 05a - Seção 2: Fator Redutor “Q”

Suscetibilidade à Flambagem Local

- A suscetibilidade à flambagem local é função da seção transversal apenas.
- Ela não é influenciada pelo comprimento longitudinal da peça.
- A flambagem local é representada nos cálculos pelo **fator redutor "Q"** sendo este composto por:

$$Q = Q_s \cdot Q_a$$

Q_s → fator redutor devido a instabilidade em **elemento não-enrijecido (AL)** que compõe a seção transversal;

Q_a → fator redutor devido a instabilidade **em elemento enrijecido (AA)** que compõe a seção transversal;

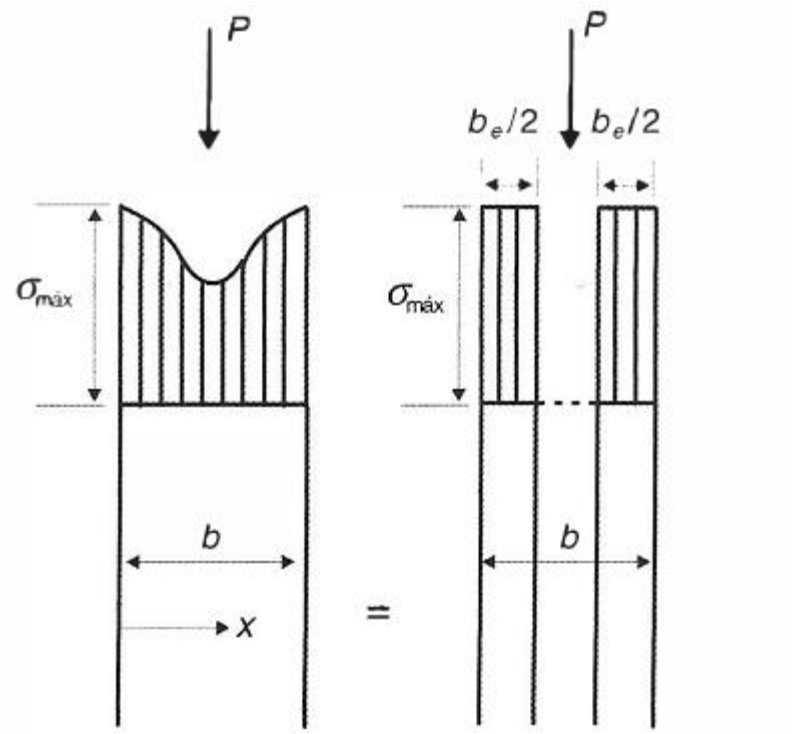
Q_a – *Elementos Comprimidos AA (1)*

- Para os elementos comprimidos AA, ou seja, elementos enrijecidos (como almas de perfis I , U ou H) vale a seguinte regra:

$$Q_a = \frac{A_{ef}}{A_g}$$

Ag – área bruta da seção transversal

Aef – área efetiva da seção transversal (descontados os efeitos da flambagem local)



5a.2.2 Q_a – Elementos Comprimidos AA (2)

- O cálculo da área efetiva Aef se faz por meio de:

$$A_{ef} = A_g - \sum\left(b - b_{ef}\right) \mathrm{t}$$

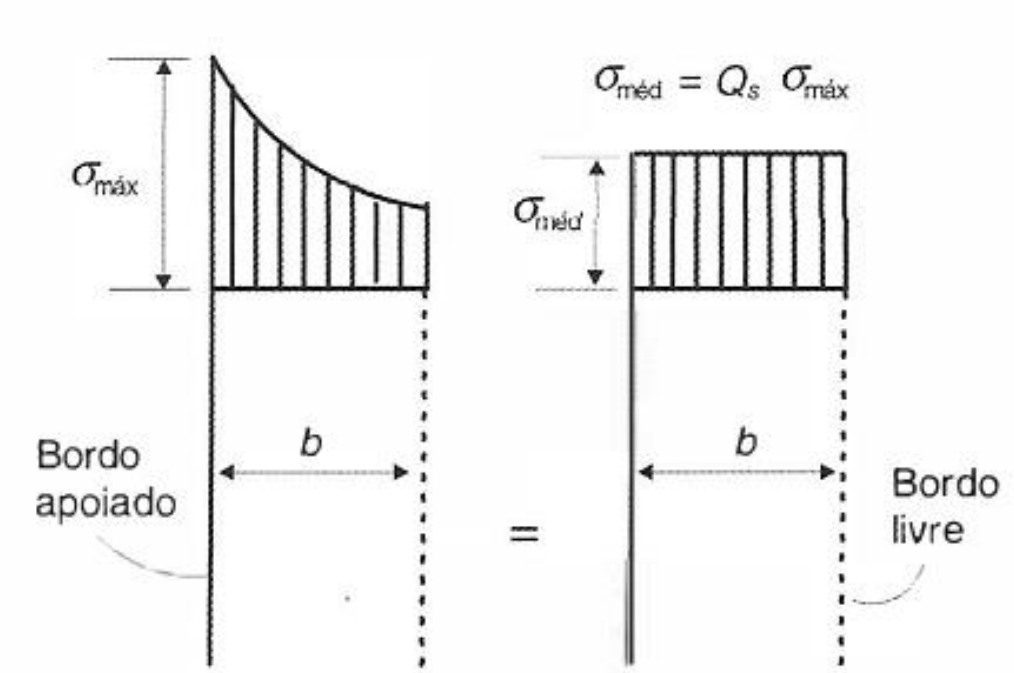
$$b_{ef} = 1,92t\sqrt{\frac{E}{\sigma}}\left[1 - \frac{c_a}{b/t}\sqrt{\frac{E}{\sigma}}\right] \leq b$$

c_a – é um coeficiente, igual a **0,38** para mesas ou almas de seções tubulares retangulares e **0,34** para todos os demais casos

σ - é a tensão que pode atuar no elemento analisado tomada igual **σ = χ . fy** ou conservadoramente **σ = fy**

Q_s – *Elementos Comprimidos AL (1)*

- No caso dos elementos comprimidos não-enrijecidos não existe reserva de resistência após a flambagem.
- Assim sendo o cálculo é feito numa situação anterior à flambagem com uma tensão média $\boldsymbol{\sigma_{média} = Q_s \sigma_{máx}}$



Q_s – *Elementos Comprimidos AL (2)*

- O fator Qs é determinado mediante duas possibilidades de ocorrência de flambagem:
  - **FLAMBAGEM INELÁSTICA:**
    - *flambagem que ocorre após o material exceder o limite de escoamento;*
  - **FLAMBAGEM ELÁSTICA:**
    - *flambagem que ocorre antes mesmo do material atingir o limite de escoamento;*
    - *indica um desperdício de material pela adoção de uma peça muito esbelta;*

Q_s – *Elementos Comprimidos AL (3)*

- O coeficiente Qs pode ser obtido com equações no formato a seguir

  - **FLAMBAGEM INELÁSTICA:**

$$Q_s = A - B\ \frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}} \leq 1 \qquad para \qquad \left(\frac{b}{t}\right)_r \leq \frac{b}{t} \leq \left(\frac{b}{t}\right)_e$$

  - **FLAMBAGEM ELÁSTICA:**

$$Q_s = \frac{CE}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2} \qquad para \qquad \frac{b}{t} > \left(\frac{b}{t}\right)_e$$

Q_s – *para o grupo 3*

- **FLAMBAGEM INELÁSTICA:**

$$Q_s = 1{,}340 - 0{,}76\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{para} \quad 0{,}45\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 0{,}91\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- **FLAMBAGEM ELÁSTICA:**

$$Q_s = \frac{0{,}53\,E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para} \quad \frac{b}{t} > 0{,}91\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Q_s – *para o grupo 4*

- **FLAMBAGEM INELÁSTICA:**

$$Q_s = 1{,}415 - 0{,}74\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{para} \quad 0{,}56\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- **FLAMBAGEM ELÁSTICA:**

$$Q_s = \frac{0{,}69\,E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para} \quad \frac{b}{t} > 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Q_s – *para o grupo 5*

- **FLAMBAGEM INELÁSTICA:**

$$Q_s = 1{,}415 - 0{,}65\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{k_c E}}, \quad \text{para} \quad 0{,}64\sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}} < \frac{b}{t} \leq 1{,}17\sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$$

- **FLAMBAGEM ELÁSTICA:**

$$Q_s = \frac{0{,}90\,E\,k_c}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para} \quad \frac{b}{t} > 1{,}17\sqrt{\frac{E}{(f_y/k_c)}}$$

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{h/t_w}}, \text{ sendo } \; 0{,}35 \leq k_c \leq 0{,}76$$

5a.2.7 Q_s – para o grupo 6

- **FLAMBAGEM INELÁSTICA:**

$$Q_s = 1{,}908 - 1{,}22\frac{b}{t}\sqrt{\frac{f_y}{E}}, \quad \text{para} \quad 0{,}75\sqrt{\frac{E}{f_y}} < \frac{b}{t} \leq 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

- **FLAMBAGEM ELÁSTICA:**

$$Q_s = \frac{0{,}69\,E}{f_y\left(\frac{b}{t}\right)^2}, \quad \text{para} \quad \frac{b}{t} > 1{,}03\sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Orientações quanto às expressões anteriores:

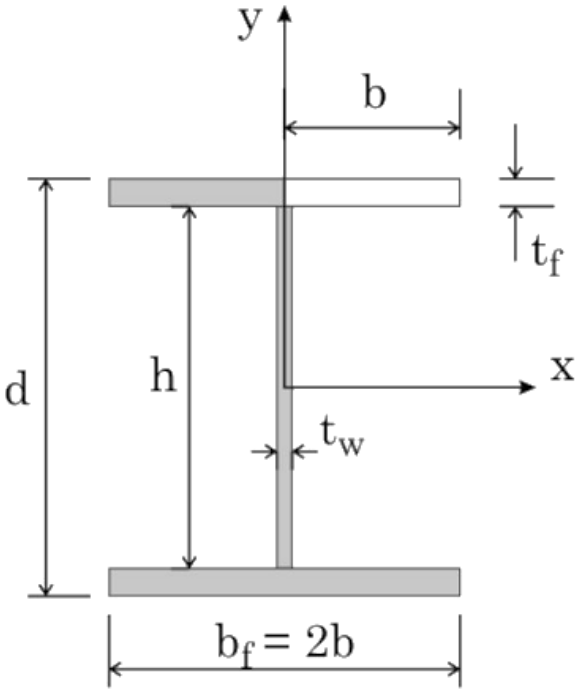
- **h** – é a altura da alma;
- **tw** – é a espessura da alma;
- **b** e **t** são a largura e a espessura do elemento respectivamente
- *Se existirem dois ou mais elementos AL com fatores de redução Qs diferentes, deve-se adotar o menor destes fatores.*

FIM

Exercício 5a.1

- Verificação de um elemento comprimido com seção duplamente simétrica. **Determinar a máxima força de compressão** que pode ser aplicada à uma **coluna bi-rotulada com 3000 mm** de comprimento entre as suas fixações, sendo dado:
  - **Aço A-36**;
  - **Perfil I – 160 x 17,9 mm (série europeia, perfil laminado)**

- *Considerar efeitos de flambagem local*



A = 22,80 cm2

tf = 9,51mm tw = 6,3 mm

bf = 74 mm d = 160 mm

rx = 6,40 cm ry = 1,55 cm

Exercício 5a.2

- Uma treliça tem suas barras comprimidas constituídas por cantoneiras. Sabendo que a máxima **força de compressão, em valor de cálculo, na barra mais solicitada da treliça é de 800 kN. Verifique se as dimensões propostas estão compatíveis.**

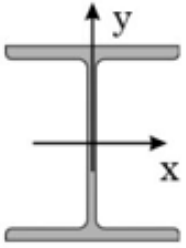
- Dados:
  - Comprimento da barra 2000 mm (presa apenas pelas extremidades)
  - Aço A36
  - Perfil 2L – 152x152x12,7 mm
  - Propriedades do perfil (Tabela Usiminas)
  - As cantoneiras não são soldadas ao longo do comprimento.

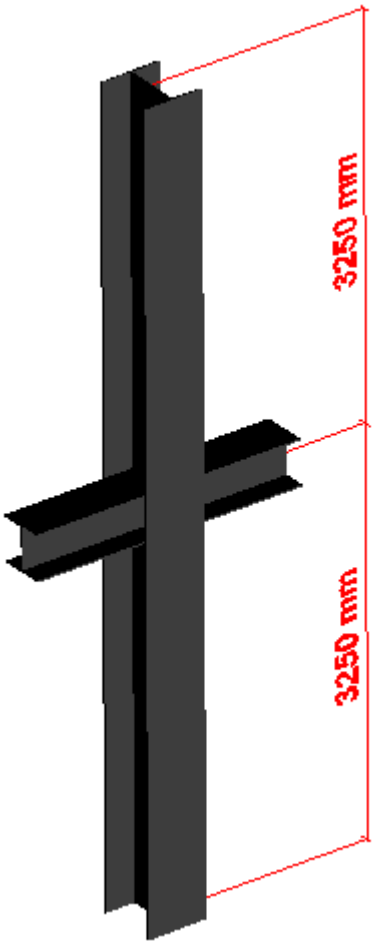
  - $A_g = 37{,}1\,cm^2$; $r_x = r_y = 4{,}72\,cm$; $J_x = J_y = 828\,cm^4$
  - $r_{min} = 3{,}0\,cm.$

- *Considerar efeitos de flambagem local*

Exercício 5a.3

- Para a coluna da figura ao lado, a ser construída em **aço MR-250**, **verificar se o perfil adotado resiste uma força normal de compressão centrada, em valor de cálculo, de 850 kN**.
  - *Considerar efeitos de flambagem local.*
  - *Considerar todas as extremidades como rotuladas*
- Dimensões do perfil soldado:
  - **bf = 350 mm**
  - **tf = 8 mm**
  - **hw = 400 mm**
  - **tw = 8 mm**

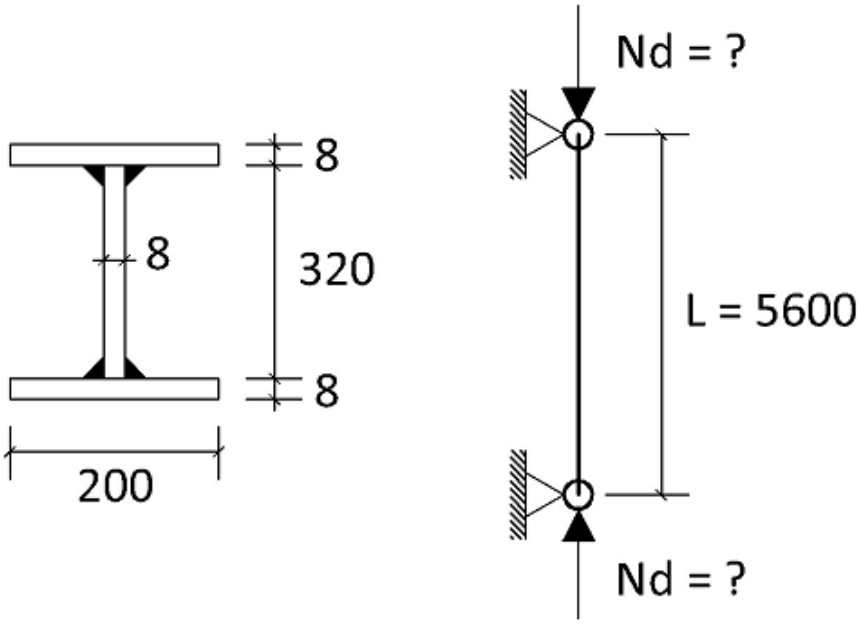




Exercício 5a.4

- Um pilar **bi-rotulado** é feito de um **perfil H soldado**, fabricado com duas **chapas de 8 mm x 200 mm nas mesas**, e uma **chapa de 8 mm x 320 mm na alma**, todas em **aço MR250**. Dado que a altura do pilar é **L = 5600 mm**, calcule a **máxima carga de compressão centrada (Nd – valor de projeto) que o pilar é capaz de suportar**.

- *Considerar efeitos de flambagem local*



Exercício 5a.5

- Um pilar **engastado na base e livre no topo** é composto de um **perfil H soldado**, fabricado com **duas chapas de 6.3 mm x 250 mm nas mesas** e **uma chapa de 5.6 mm x 300 mm na alma**, todas em aço **MR250**. Dado que a altura do pilar é **L = 4100 mm**, **verifique se o pilar suportará uma carga de compressão centrada em valor de cálculo de Nd = 300 kN**.

- *Considerar efeitos de flambagem local*

