

**CONSTRU  
METAL**  
2023

**2 1 s e t**  
8 h - 21 h  
allianz parque  
são paulo - sp

# CONTRIBUIÇÕES TECNOCIENTÍFICAS

REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO/PROMOÇÃO

**Francal Feiras** DESDE 1969

# DIMENSIONAMENTO DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO NA COMPRESSÃO AXIAL: INTERAÇÃO LD ENTRE MODOS DE FLAMBAGEM LOCAL E DISTORCIONAL

Gustavo Yoshio Matsubara

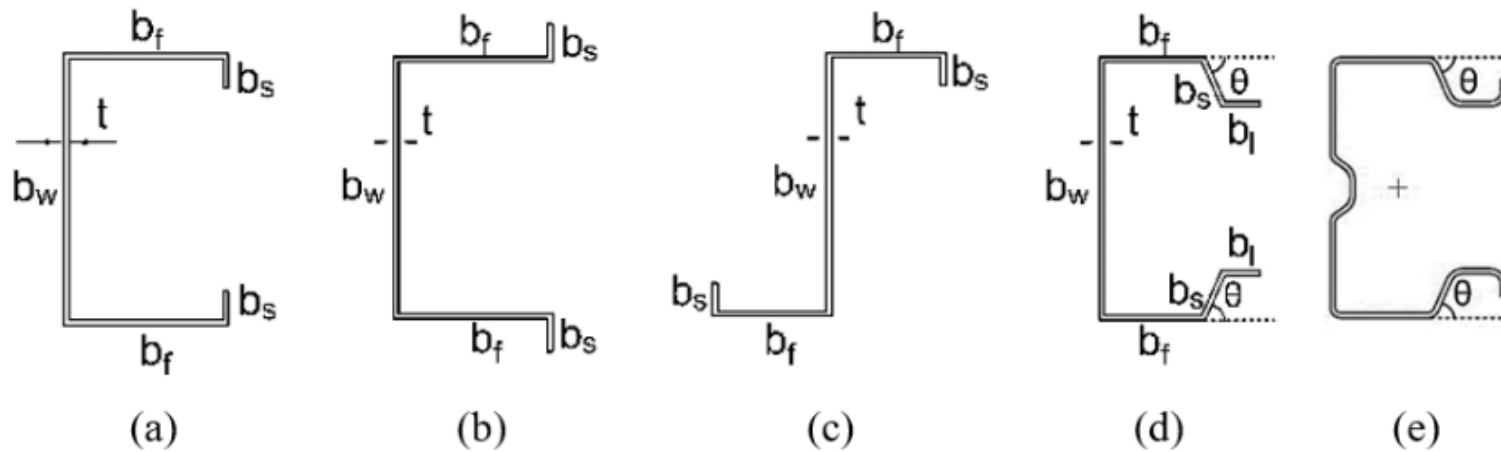
Aluno de doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ

Eduardo de Miranda Batista

Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ

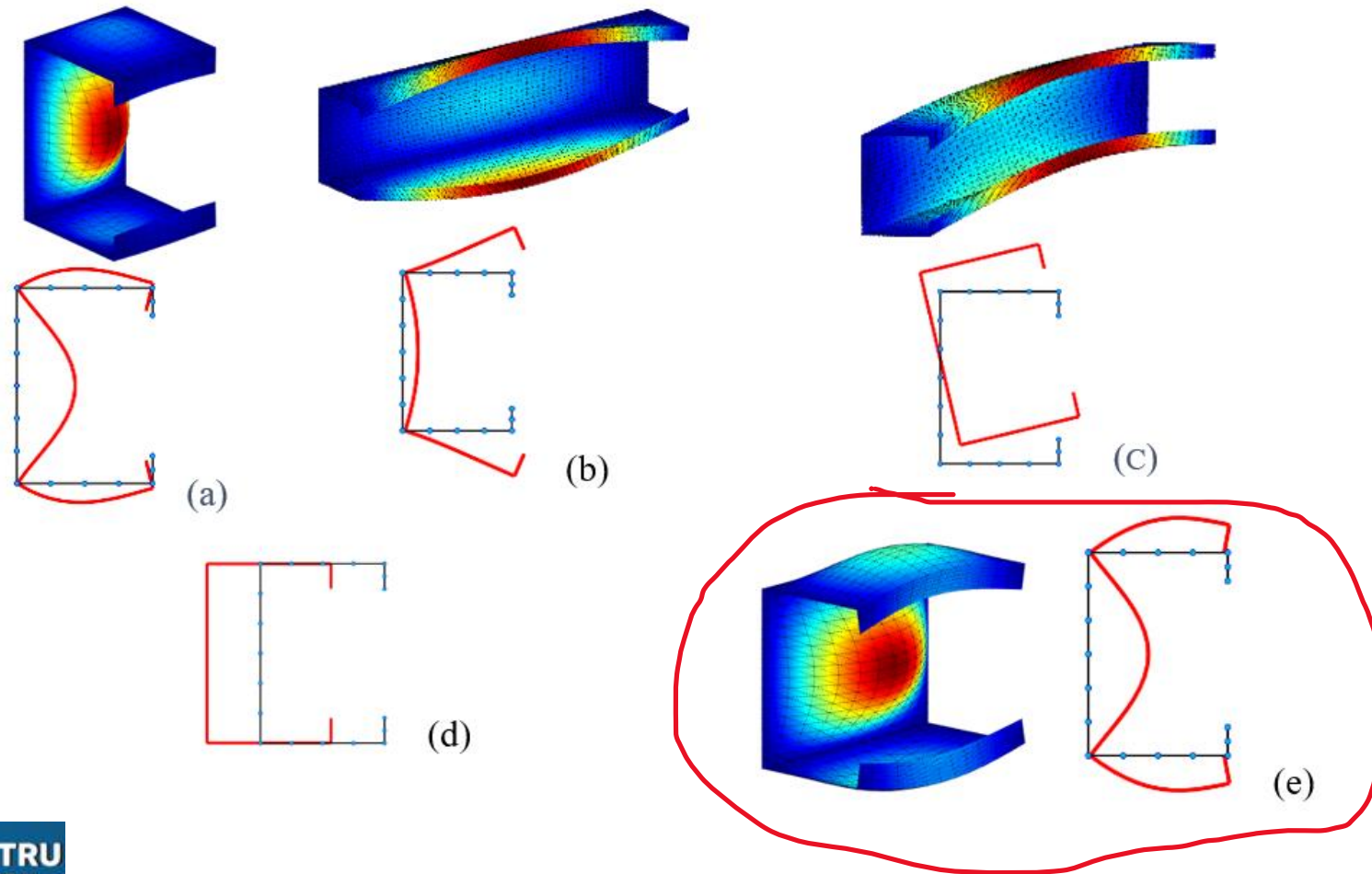
Laboratório de Estruturas e Materiais, LABEST

# Introdução: seções usuais de perfis de aço formados a frio, PFF



- a) U enrijecido
- b) Cartola
- c) Z enrijecido
- d) Rack
- e) Rack com enrijecedor intermediário

# Modos de flambagem de PFF na compressão axial



- a) Local
- b) Distorcional
- c) Global de flexo torção
- d) Global de flexão
- e) **Interação LD, local e distortional**

# NBR 14762:2010: resistência de barras de PFF na compressão axial

$$\chi_n = \begin{cases} (0,658\lambda_G^2) & \lambda_G \leq 1,50 \\ \left(\frac{0,877}{\lambda_G^2}\right) & \lambda_G > 1,50 \end{cases} \quad \text{com} \quad \lambda_G = \sqrt{\frac{P_y}{P_G}}$$

$$P_{nG} = \chi_n P_y$$

$$P_{nL} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_L^{0,80}}\right) \frac{P_y}{\lambda_L^{0,80}} \quad \text{com} \quad \lambda_L = \sqrt{\frac{P_y}{P_L}}$$

$$P_{nLG} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_{LG}^{0,80}}\right) \frac{P_{nG}}{\lambda_{LG}^{0,80}} \quad \text{com} \quad \lambda_{LG} = \sqrt{\frac{P_{nG}}{P_L}}$$

$$P_{nD} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_D^{1,20}}\right) \frac{P_y}{\lambda_D^{1,20}} \quad \text{com} \quad \lambda_D = \sqrt{\frac{P_y}{P_D}}$$

## Modos de flambagem:

a) Global G

b) Local L

c) Local-Global LG

d) Distorcional D

Interação entre modos de flambagem considerada:

LG

Interação entre modos de flambagem relevantes e não consideradas:

LD e LDG

Variáveis relevantes no estudo da interação LD entre modos de flambagem de PFF na compressão axial

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{P_y}{P_L}} \quad \text{Índice de esbeltez L}$$

$$P_y = A f_y$$

$P_L$ : força crítica de flambagem Local

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{P_y}{P_D}} \quad \text{Índice de esbeltez D}$$

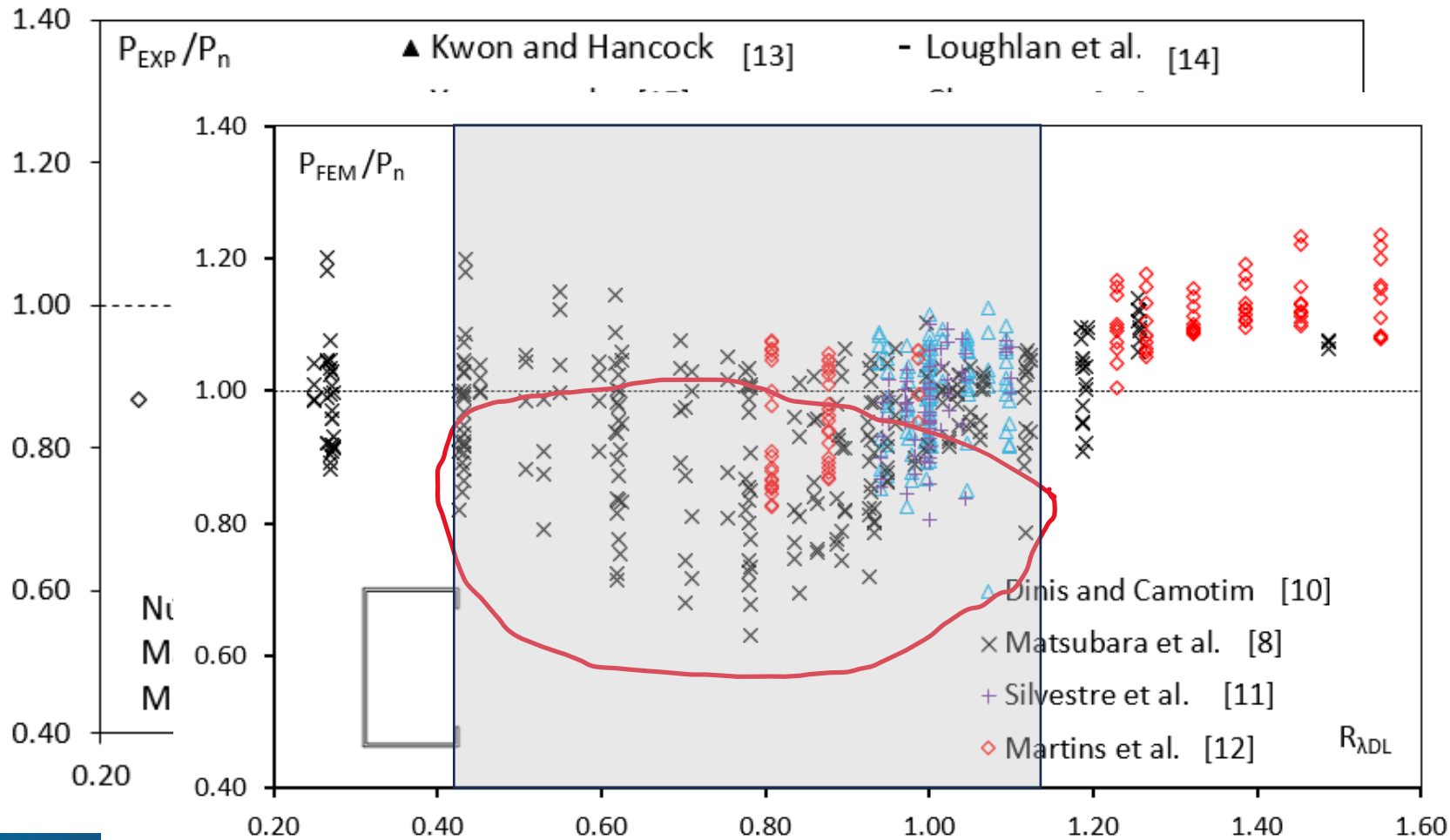
$P_D$ : força crítica de flambagem Distorcional

$$\lambda_{maxLD} = \max(\lambda_L \text{ e } \lambda_D)$$

$$R_{\lambda DL} = \lambda_D / \lambda_L \quad \text{Fator LD}$$

# Relevância do modo LD: seção U enrijecido

Comparação entre resultados experimentais e do MEF com as equações na NBR 14762



Resultados de resistência das colunas:

$P_{EXP}$  : Experimental

$P_{FEM}$  : MEF

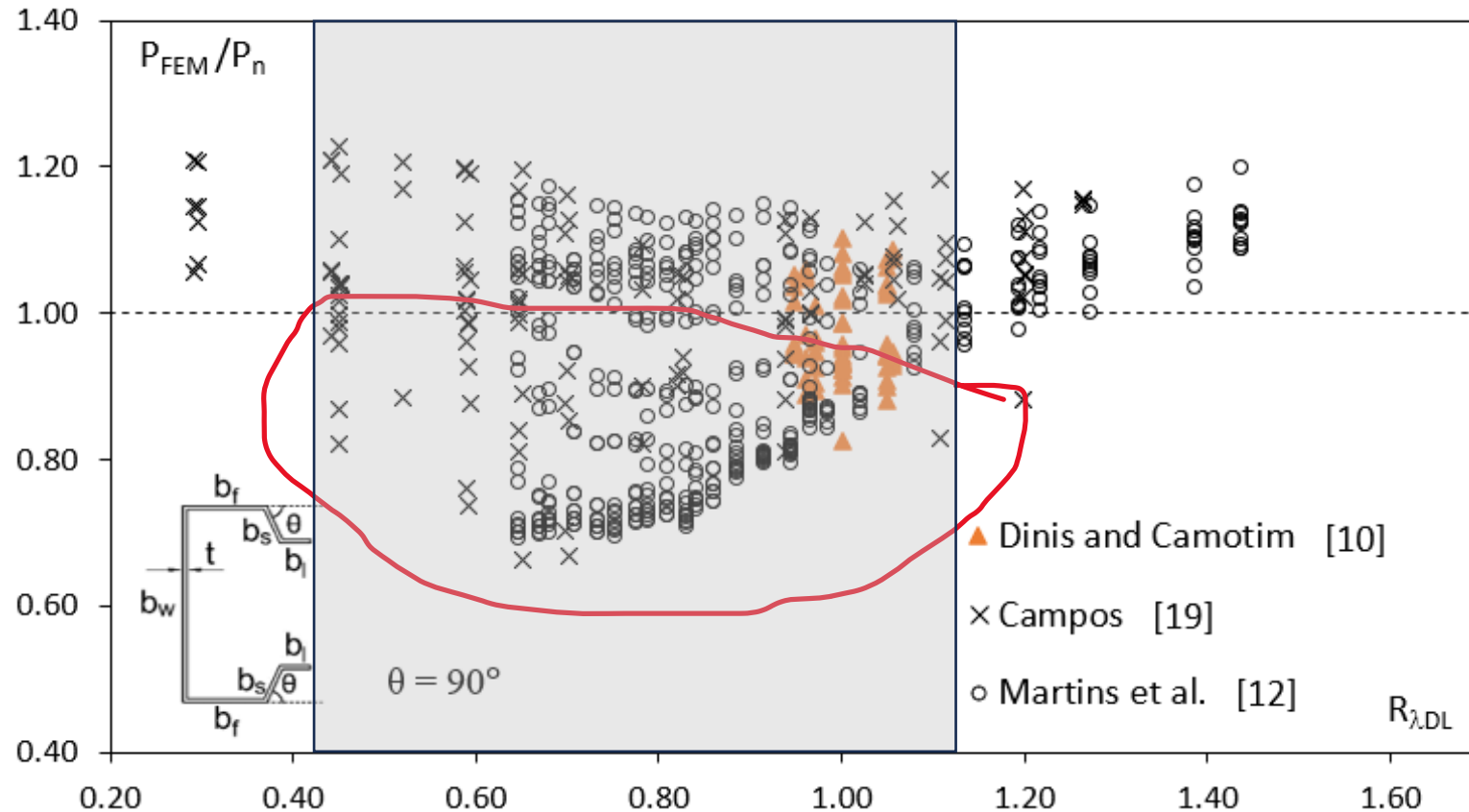
$P_n$  : NBR14762

Em função da relação entre esbeltezas Distorcional e Local:

$$R_{\lambda DL} = \lambda_D / \lambda_L$$

# Relevância do modo LD: seção Rack

Comparação entre resultados experimentais e do MEF com as equações na NBR 14762



Resultados de resistência das colunas:

$P_{EXP}$  : Experimental

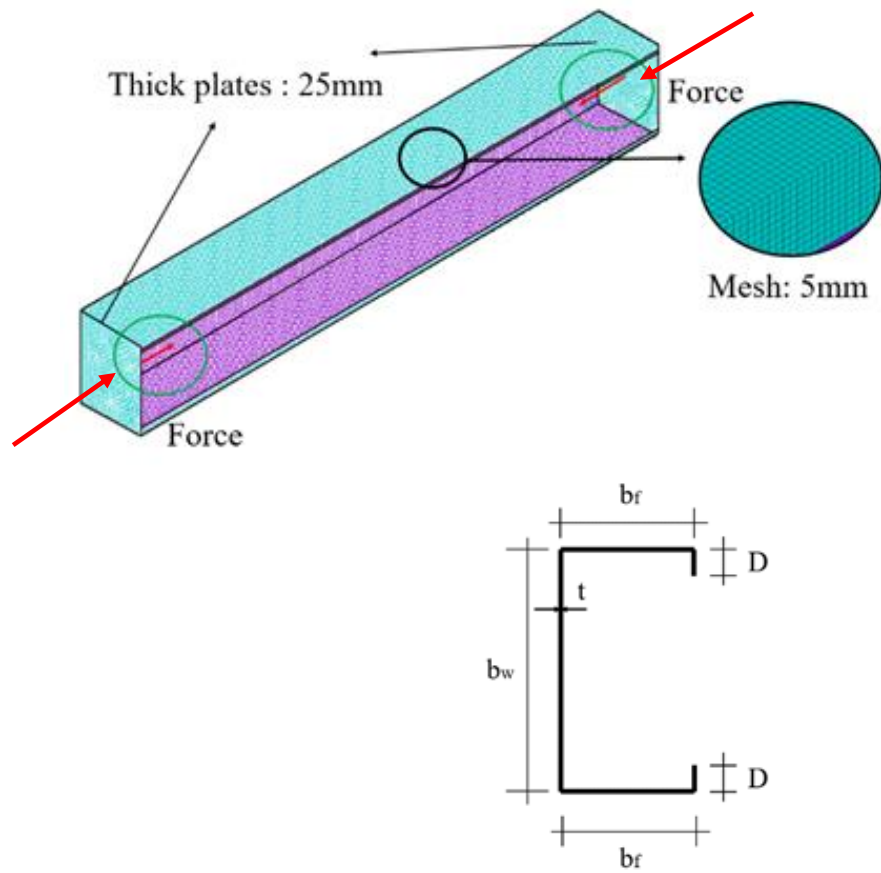
$P_{FEM}$  : MEF

$P_n$  : NBR14762

Em função da relação entre esbeltezas Distorcional e Local:

$$R_{\lambda_{DL}} = \lambda_D / \lambda_L$$

# Modelo de análise pelo MEF: programa computacional Ansys. Calibrado com resultados experimentais

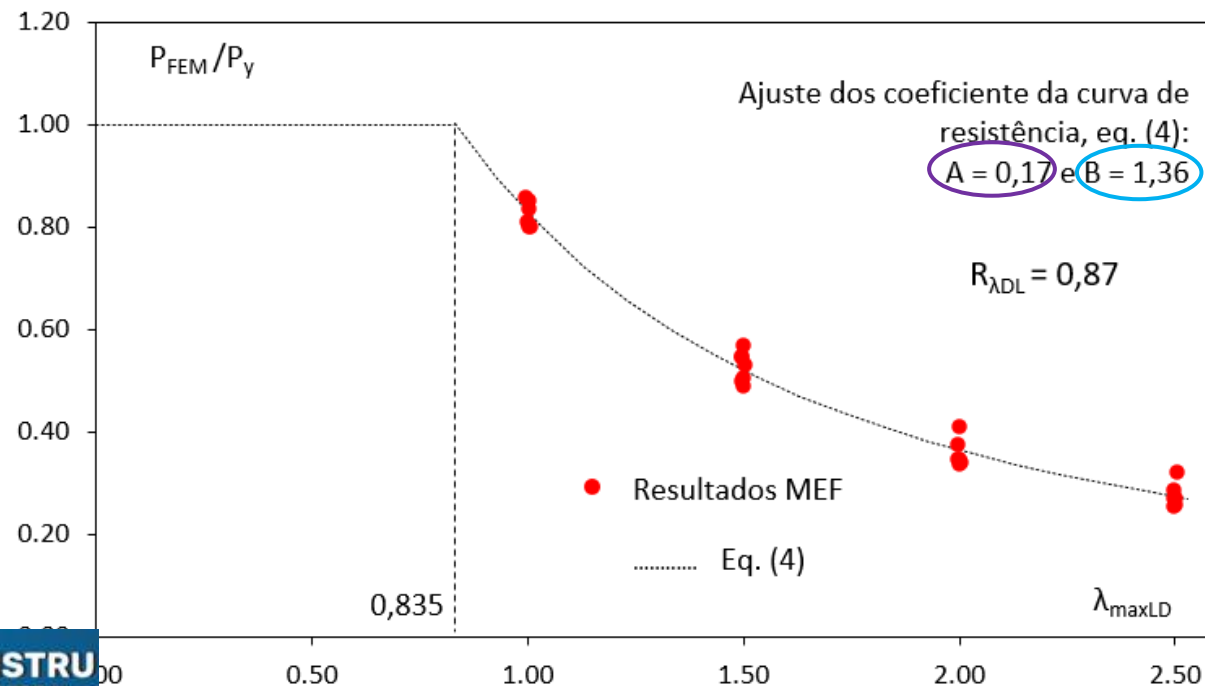


- (i) Elemento quadrilateral SHELL 181.
- (ii) Chapas rígidas de aço nas extremidades, com 25mm de espessura, de acordo com o procedimento experimental.
- (iii) Carregamento aplicado com um forças concentradas no centroide das seções de extremidade da coluna de PFF.
- (iv) Módulo de elasticidade  $E=210$  GPa e coeficiente de Possion  $\nu=0,30$ .
- (v) A plasticidade do material seguiu o modelo bi linear isotrópico, com o escoamento segundo o critério de von Mises e material isotrópico.
- (vi) Método do comprimento de arco (Riks) para acessar a carga limite em regime elastoplástico.
- (vii) Imperfeições geométricas iniciais na forma do primeiro modo de flambagem,  $L$  ou  $D$ . Amplitude máxima de 10% da espessura da chapa ( $0,1t$ ).
- (viii) As tensões residuais não foram consideradas.
- (ix) Os cantos dobrados arredondados dos PFF foram adotados como retos.

# Procedimento para o dimensionamento de colunas de PFF na interação LD, com base no modelo calibrado de análise pelo MEF

$$P_{nLD} = P_y = Af_y \quad \text{para} \quad \lambda_{maxLD} \leq \sqrt[3]{0,50 + \sqrt{0,25 - A}}$$

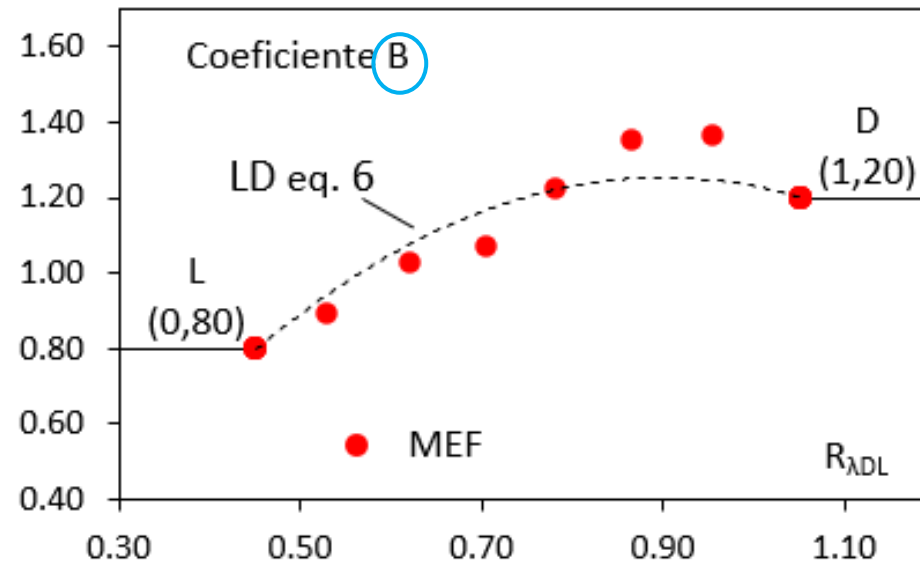
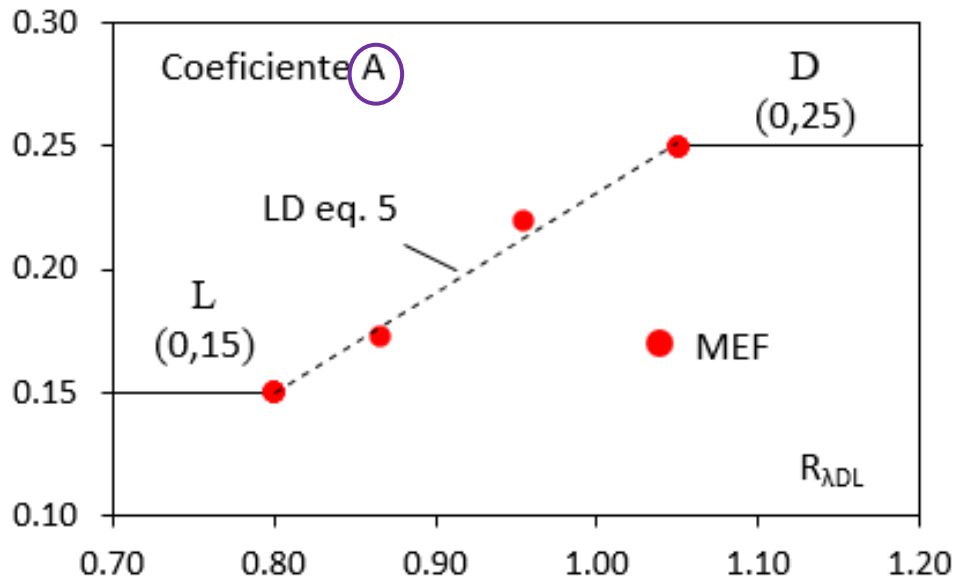
$$P_{nLD} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{maxLD}^B}\right) \frac{P_y}{\lambda_{maxLD}^B} \quad \text{para} \quad \lambda_{maxLD} > \sqrt[3]{0,50 + \sqrt{0,25 - A}}$$



- (i) A resistência deve ser definida pela equação genérica (equação de Winter), seguindo-se a configuração usual adotada na norma brasileira NBR 14762.
- (ii) Os coeficientes A e B na equação foram determinados com base em resultados das análises com auxílio do modelo do MEF.
- (iii) Foram obtidos resultados para uma ampla variação das principais variáveis do problema:
  - A esbeltez da seção  $\lambda_{maxLD} = \max\{\lambda_L, \lambda_D\}$  variando de 1,0 a 2,5;
  - A razão entre aos índices de esbeltez D e L,  $R_{\lambda DL} = \lambda_D/\lambda_L$ , variando de 0,27 a 1,49.

# Calibração dos coeficientes A e B na equação de resistência para colunas com interação LD

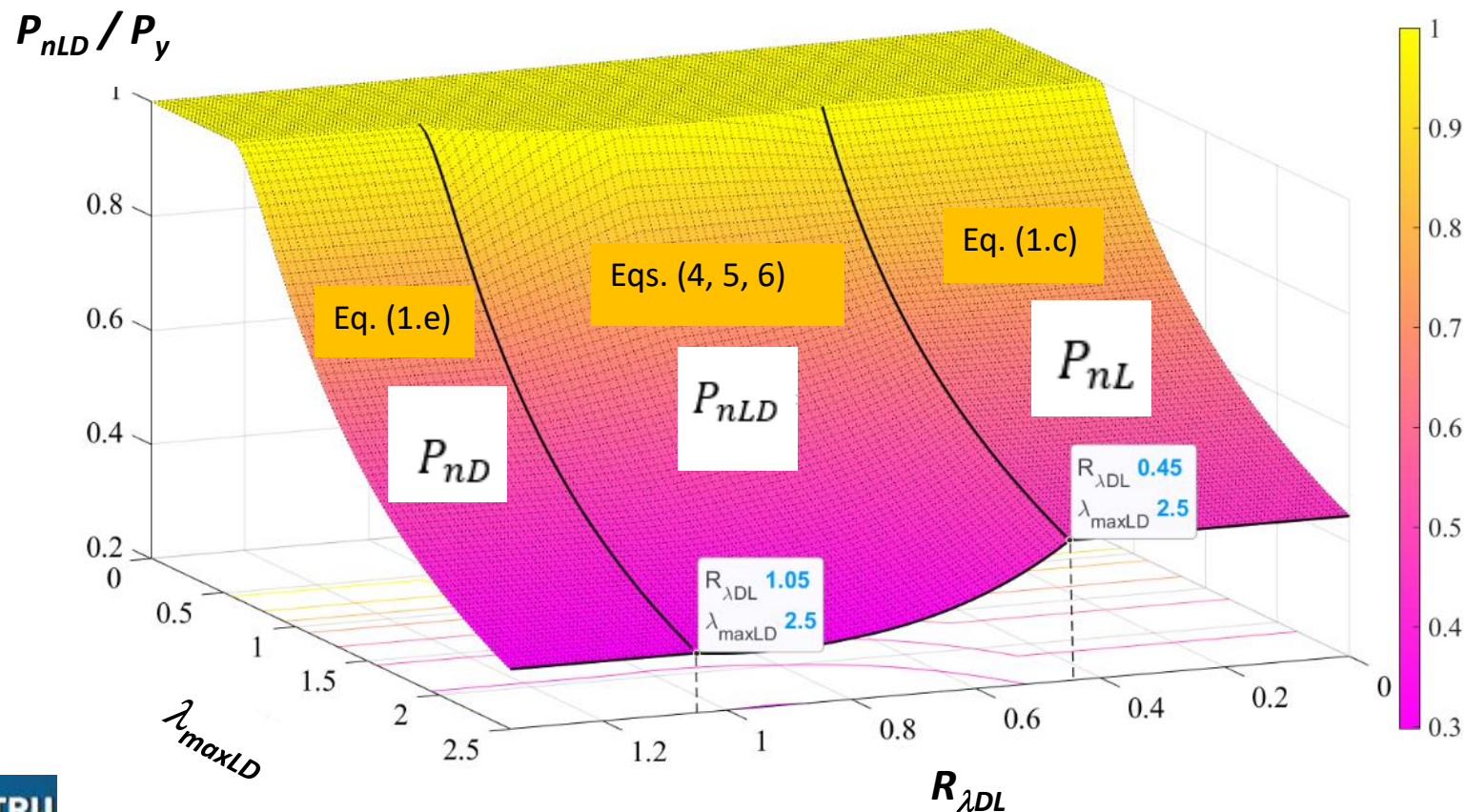
$$P_{nLD} = \left( 1 - \frac{A}{\lambda_{maxLD} B} \right) \frac{P_y}{\lambda_{maxLD} B}$$



$$A = \begin{cases} 0,15 & R_{\lambda DL} < 0,80 \\ 0,40 R_{\lambda DL} - 0,17 & 0,80 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 0,25 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0,80 & R_{\lambda DL} < 0,45 \\ -2,26 R_{\lambda DL}^2 + 4,06 R_{\lambda DL} - 0,57 & 0,45 \leq R_{\lambda DL} \leq 1,05 \\ 1,20 & R_{\lambda DL} > 1,05 \end{cases}$$

# Superfície de resistência proposta para colunas de PFF: inclui os casos de flambagem L, D e LD



$$P_{nL} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_L^{0,80}}\right) \frac{P_y}{\lambda_L^{0,80}}$$

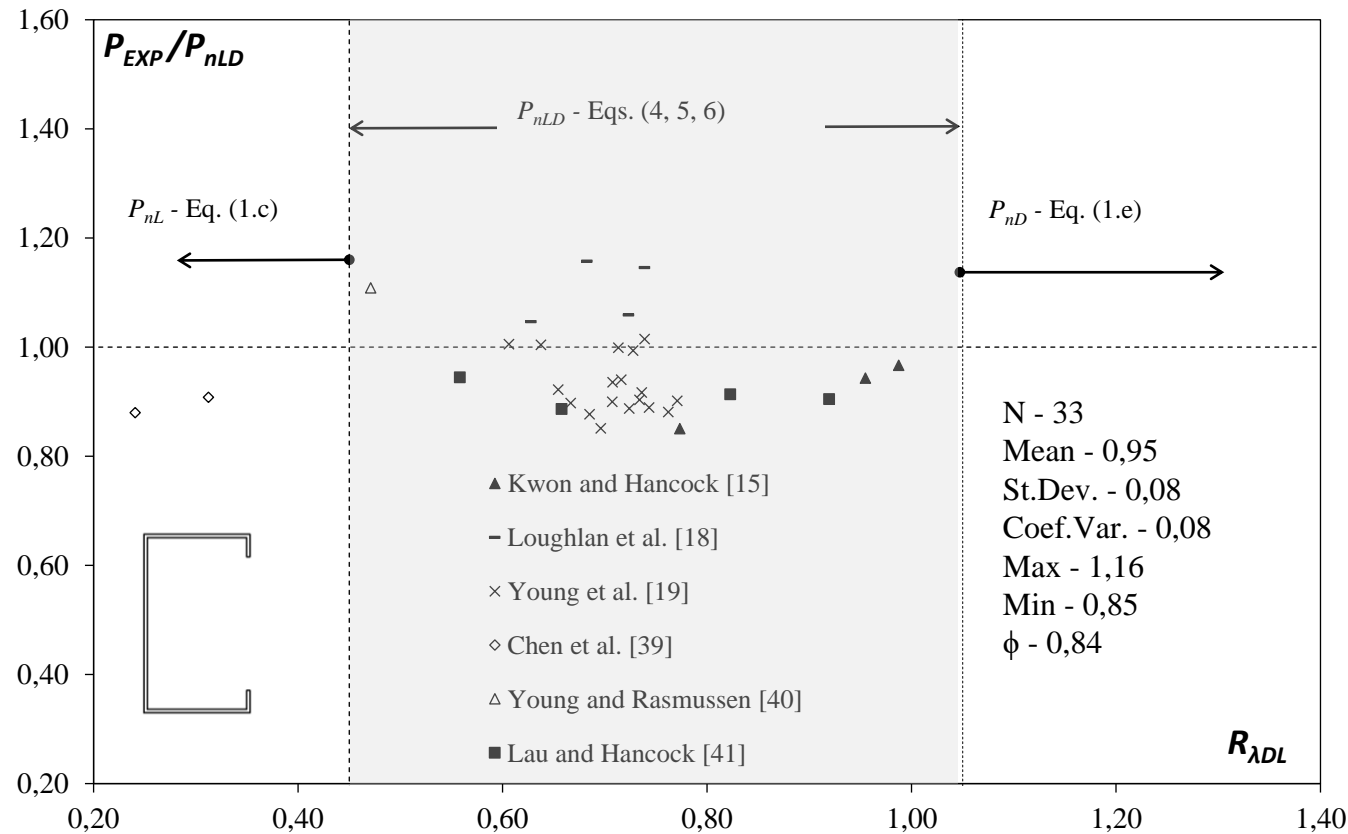
$$P_{nD} = \left(1 - \frac{0,25}{\lambda_D^{1,20}}\right) \frac{P_y}{\lambda_D^{1,20}}$$

$$P_{nLD} = \left(1 - \frac{A}{\lambda_{maxLD}^B}\right) \frac{P_y}{\lambda_{maxLD}^B}$$

$$A = \begin{cases} 0,15 \\ 0,40 R_{\lambda DL} - 0,17 \\ 0,25 \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} 0,80 \\ -2,26 R_{\lambda DL}^2 + 4,06 R_{\lambda DL} - 0,57 \\ 1,20 \end{cases}$$

# Calibração da proposta de dimensionamento de colunas de PFF na interação Local-Distorcional, LD. Análise de confiabilidade.



Análise de confiabilidade, NBR 14762:2010

Coefficiente de resistência:

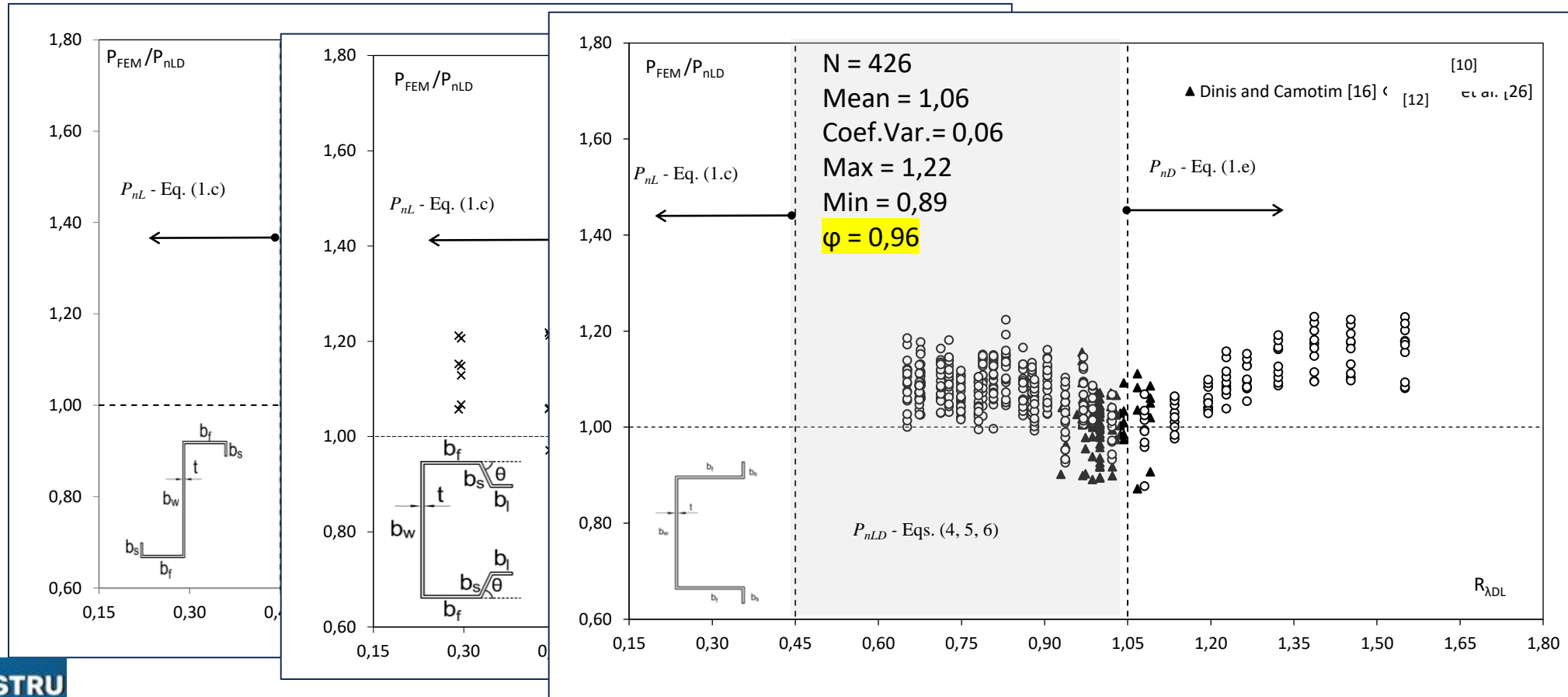
$\phi$ : LRFD, norma Norte Americana

$\gamma=1/\phi$ : MEL, NBR 14762:2010.

$\gamma = 1/\phi = 1,19 < 1,2$  (segundo a NBR 14762)

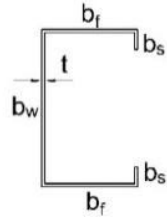
$$\phi = C_{\phi} M_m F_m P_m e^{-\beta_0 \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + C_p V_p^2 + V_Q^2}}$$

# Calibração da proposta de dimensionamento de colunas de PFF na interação Local-Distorcional, LD (cont.). Análise de confiabilidade.



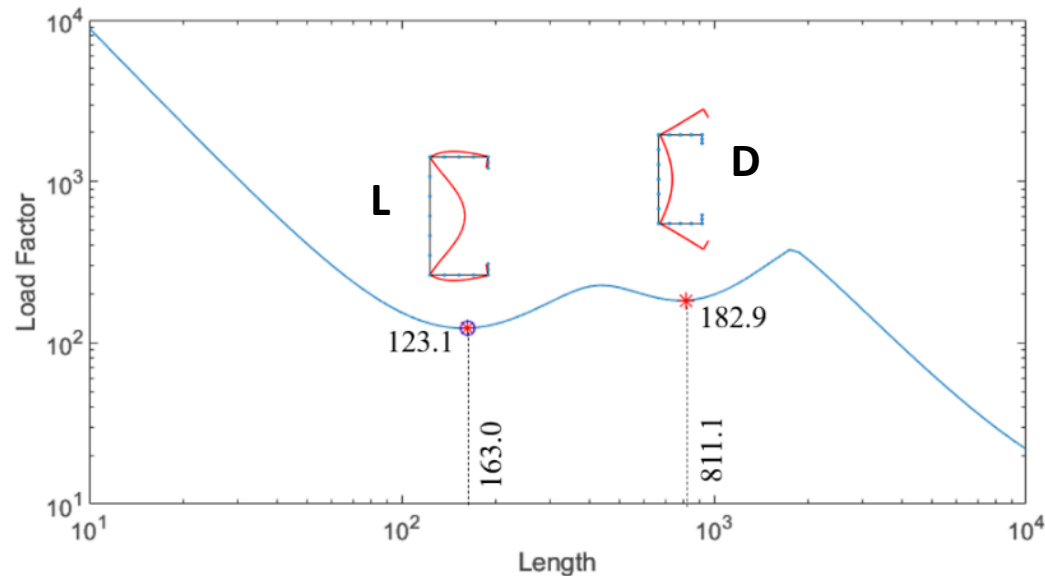
## EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO: compressão axial de PFF de seção U enrijecido

- Ue 200 x 100 x 20 x 2,25
- Aço: ASTM A572 Gr 50,  $f_y=345$  MPa  
 $E=200$  GPa,  $\nu=0,3$ .
- Comprimento:  $L= 1,00$  m. Extremidades: simplesmente apoiadas, empenamento livre.
- Análise da flambagem pelo **software FStr**: cargas críticas  $P_L=123,1$  kN e  $P_D=182,9$  kN.



- Propriedades geométricas da seção, calculadas pelo **software FStr**:

Geometric Properties			
Area	969.75	xg	30.73
J*	1636.453	yg	98.88
Ixg	6432405.205	I1	6432405.205
Iyg	1296982.419	I2	1296982.419
Ixyg	-0.000	theta	0.00
xc*	-45.14	x0*	75.87
yc*	98.86	y0*	0.02
Cw*	10137042961	r0*	117.162



## EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO (continuação)

MRD, NBR 14762:2010

Cargas críticas de força plástica

$$P_L = 123,1 \text{ kN}$$

$$P_D = 182,9 \text{ kN}$$

$$P_G = 1481,7 \text{ kN} \quad (\text{flexo torção})$$

$$P_y = Af_y = 334,6 \text{ kN}$$

Índices de esbeltes

$$\lambda_L = 1,65$$

$$\lambda_D = 1,35$$

$$\lambda_G = 0,48$$

Proposta de dimensionamento para o modo de flambagem LD

Cargas críticas de força plástica

$$P_L = 123,1 \text{ kN}$$

$$P_D = 182,9 \text{ kN}$$

$$P_G = 1481,7 \text{ kN} \quad (\text{flexo torção})$$

$$P_y = Af_y = 334,6 \text{ kN}$$

Índices de esbeltes

$$\lambda_L = 1,65$$

$$\lambda_D = 1,35$$

$$\lambda_G = 0,48$$

## EXEMPLO DE DIMENSIONAMENTO (continuação)

### MRD, NBR 14762:2010

Flambagem Global

$$\chi_n = 0,91 \quad (\text{eq, 1.a})$$

$$P_{nG} = \chi_n P_y = 304,4 \text{ kN} \quad (\text{eq, 1.b})$$

Flambagem LG

$$\lambda_{LG} = (P_{nG} / P_L) = 1,57 \quad (\text{eq, 1.d})$$

$$P_{nLG} = 189,8 \text{ kN} \quad (\text{eq, 1.d})$$

Flambagem Distorcional

$$P_{nD} = 192,4 \text{ kN} \quad (\text{eq, 1.e})$$

**Resistência da coluna:**

$$P_n = \min\{P_{nLG}, P_{nD}\} = 189,8 \text{ kN}$$

Comparação entre o MRD da NBR 14762:2010 e a proposta de para flambagem LD:

$$164,7 / 189,8 = 0,87$$

### Proposta de dimensionamento para o modo de flambagem LD

Flambagem Global

$$\chi_n = 0,91 \quad (\text{eq, 1.a})$$

$$P_{nG} = \chi_n P_y = 304,4 \text{ kN} \quad (\text{eq, 1.b})$$

Flambagem LG

$$\lambda_{LG} = (P_{nG} / P_L) = 1,57 \quad (\text{eq, 1.d})$$

$$P_{nLG} = 189,8 \text{ kN} \quad (\text{eq, 1.d})$$

Flambagem Local-Distortional

$$\lambda_{\text{maxLD}} = \max\{\lambda_L; \lambda_D\} = 1,65$$

$$\lambda_G / \lambda_{\text{MAXLD}} = 0,29 < 0,40 \quad (\rightarrow \text{LD})$$

$$R_{\lambda DL} = \lambda_D / \lambda_L = 0,82 \quad (>0,45 \text{ E } <1,05 \rightarrow \text{LD})$$

$$A = 0,16 \quad (\text{eq, 5})$$

$$B = 1,24 \quad (\text{eq, 6})$$

$$P_{nLD} = 164,7 \text{ kN} \quad (\text{eq, 4})$$

**Resistência da coluna:**

$$P_n = \min\{P_{nLG}, P_{nLD}\} = 164,7 \text{ kN}$$

# COMENTÁRIOS FINAIS

- A importância do modo de interação LD foi comprovada com resultados experimentais e numéricos (MEF).
- Método de dimensionamento de barras de PFF na compressão axial foi desenvolvido.
- O método segue os princípios do MRD e está de acordo com a prática de dimensionamento apresentado na NBR 14762:2010.
- O método proposto foi calibrado com resultados experimentais e numéricos (MEF).
- Os resultados das análises de confiabilidade indicaram que o método proposto pode ser aplicado com o coeficiente de resistência da norma,  $\gamma=1,2$ .

# CONSTRU METAL 2023

**2 1 s e t**  
8 h - 21 h  
allianz parque  
são paulo - sp



@congressoconstrumetal  
congressoconstrumetal.com.br

# Obrigado pela atenção

REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO/PROMOCIÓN

**Francal Feiras** DESDE 1969