

# *Comportamento, Resistência e Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio: Desenvolvimentos e Desafios*

---

## Alexandre Landesmann

Professor Titular  
Dep. Estruturas - DE/FAU  
Lab. Estruturas - LABEST/PEC/COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro



## Natan Neves

Pesquisador P.D.Sc.  
Lab. Estruturas - LABEST/PEC/COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

## **Dinar Camotim**

Professor Titular  
Instituto Superior Técnico  
Universidade de Lisboa - Portugal



# Agenda

---

1. Introdução/vantagens dos PFF

2. Dimensionamento via MRD

3. Análise de Flambagem

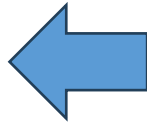
4. Estudo de Caso via MEF

Condições de incêndio

5. Considerações finais

Conceitual

Aplicação!







# Introdução



# Introdução (1/3)

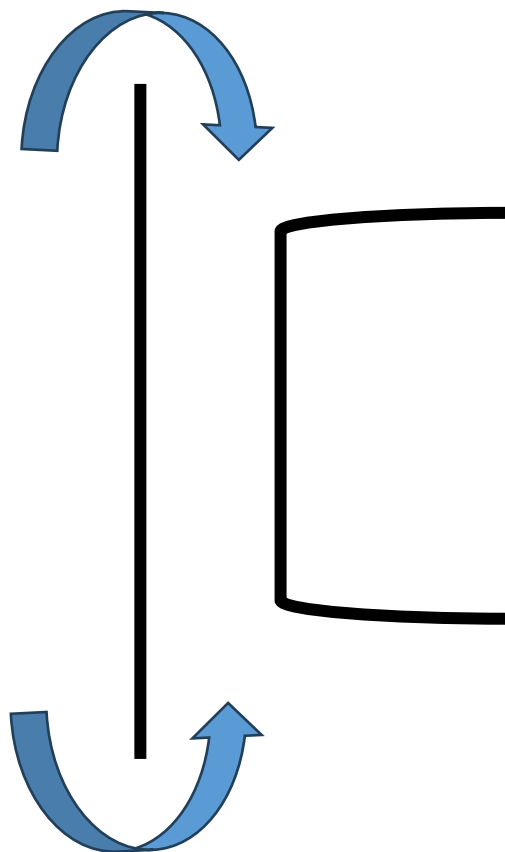
## Perfis Formados a Frio

Elementos prismáticos de espessura constante obtidos por **dobramento/conformação** com o aço em temperatura ambiente



<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil>

**espessura  $\leq 8$  mm**



**prensa  
dobradeira**



**Conformação contínua**



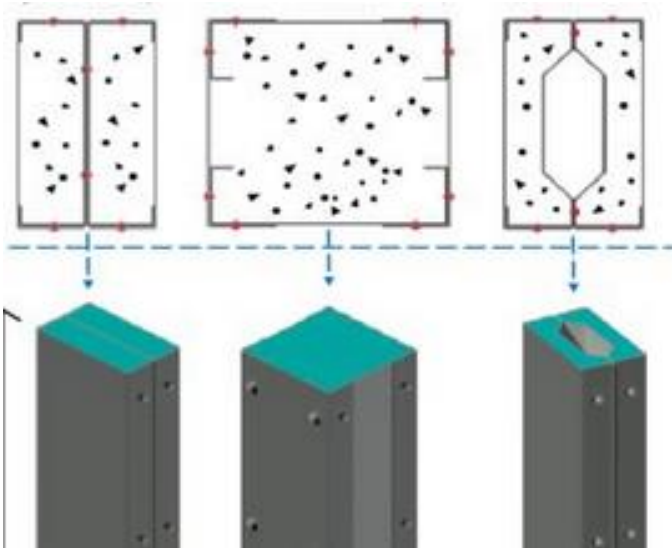
<https://buildsteel.org/why-steel/cold-formed-steel-101/cfs-and-structural-steel/>

# Introdução (2/3)

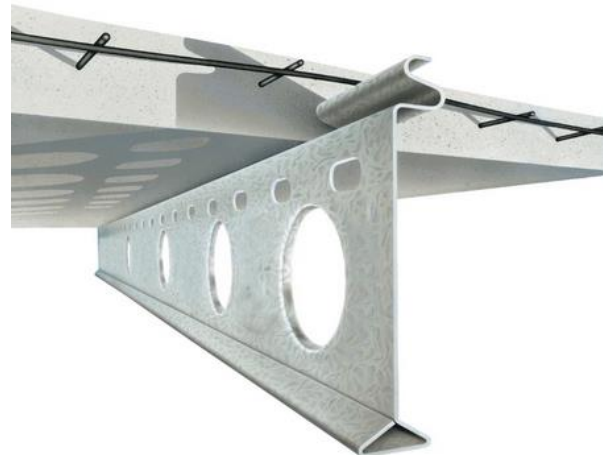
## Vantagens:

- Soluções leves, econômicas e confiáveis
- Excelente relação resistência-peso
- Associação a outros materiais

## Concreto

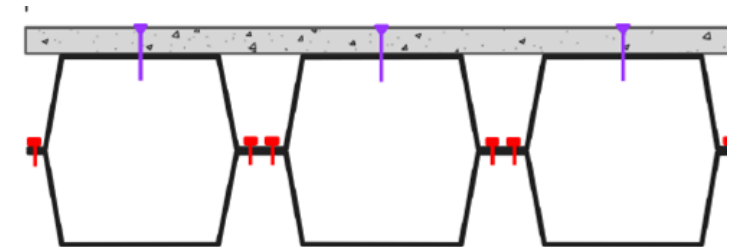


[https://www.researchgate.net/publication/364347556\\_Innovative\\_concrete-filled\\_cold-formed\\_steel\\_CF-CFS\\_built-up\\_columns](https://www.researchgate.net/publication/364347556_Innovative_concrete-filled_cold-formed_steel_CF-CFS_built-up_columns)



[https://www.speedfloor.com.au/speedfloor\\_joist.php](https://www.speedfloor.com.au/speedfloor_joist.php)

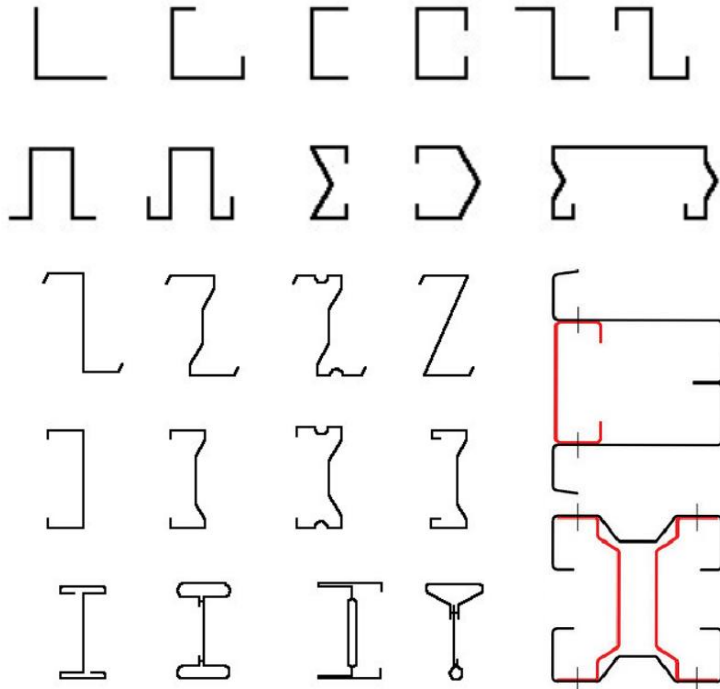
## Construção seca



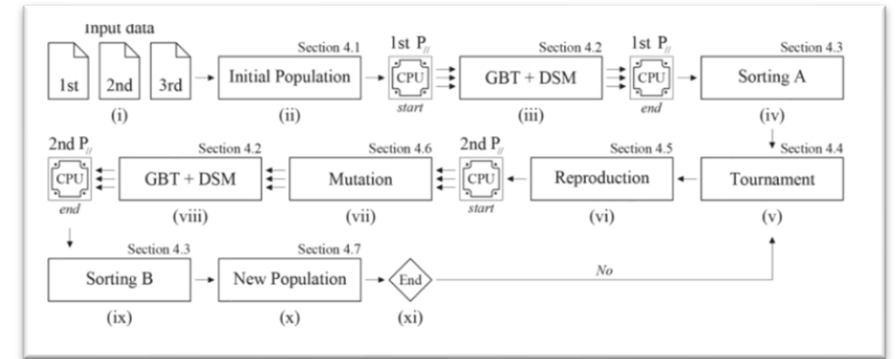
## Madeira/placas cimentícias

# Introdução (3/3)

## Versatilidade de fabricação



## Otimização via GA, IA ...



Cross-Section	R <sub>1</sub>	R <sub>1,fc</sub>	R <sub>1,fc</sub>	R <sub>1,fc</sub>	R <sub>1,fc</sub>	R <sub>1,fc</sub>
Mid-line geometry (mm)						
Wall segments	7	11	15	17	19	19
Total area (mm <sup>2</sup> )	300.30	302.15	305.85	305.85	311.37	313.19
Mid-line perimeter (mm)	341.64	343.74	347.95	347.95	354.23	356.30
P <sub>n</sub> (kN)	24.8 (LD)	37.2 (D) [+50.0%]	37.3 (D) [+50.4%]	37.8 (D) [+52.4%]	40.5 (D) [+63.3%]	40.9 (D) [+64.9%]

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823122004530>

Como realizar de forma segura e eficiente o projeto de elementos de aço formados a frio?

$$\psi S \leq \frac{R}{\gamma}$$





# Método da Resistência Direta (MRD)



# Método da Resistência Direta - MRD <sup>(1/2)</sup>

Originalmente proposto por Schafer & Peköz (1998)

Normas: {  
ABNT 14762:2010  
AISI 2016 (2020)  
AS/NZS 2018

THIN-WALLED STRUCTURES GROUP  
Professor Ben Schafer's research team

HOME RESEARCH REPORTS PUBS RELATED SITES ▾ ABOUT PEOPLE CONTACT

2023 JOURNAL PAPERS FROM THE GROUP  
December 27, 2023

2023 was a busy year for the TW Group as usual!  
Below is a list of 2023 journal articles, links

READY TO SHAKE A TEN-STORY CFS BUILDING?  
December 27, 2023

Our long-running multi-institutional cold-formed steel earthquake engineering project: CFS-NHERI is looking forward to a monumental 2024. In 2024 we will

LABORATORY  
Big Blue Baby Testing Rig

TESTING

<https://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

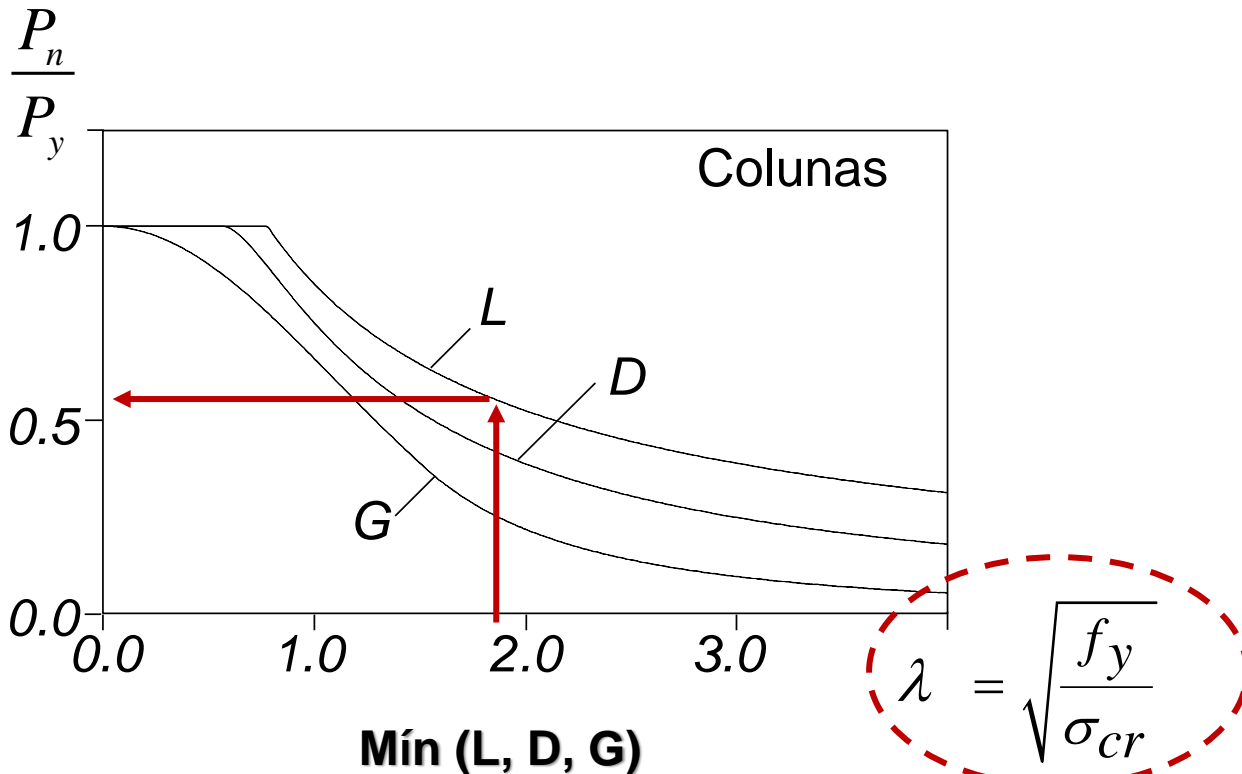
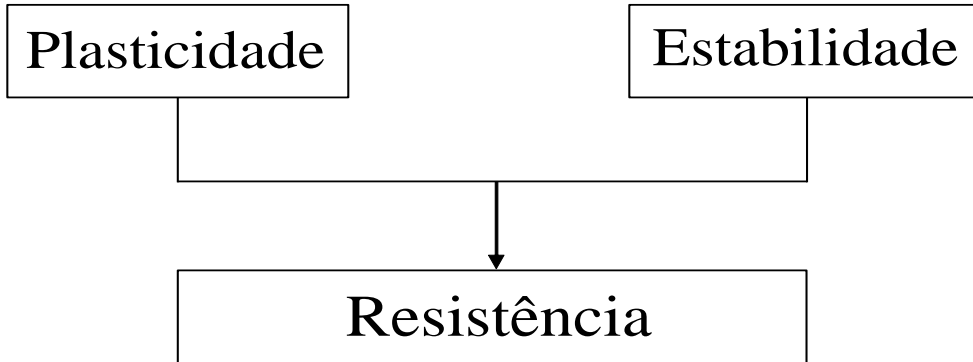
NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 14762

Segunda edição 09.07.2010  
Válida a partir de 09.08.2010

Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio  
*Design of cold-formed steel structures*

Anexo C  
(normativo)  
Método da resistência direta





## Plasticidade ( $f_y$ )

Especificação	Grau	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
ABNT NBR 6649 / ABNT NBR 6650 Chapas finas (a frio/a quente) de aço-carbono	CF-26	260/260	400/410
	CF-28	280/280	440/440
	CF-30	---/300	---/490
ABNT NBR 5004 Chapas finas de aço de baixa liga e alta resistência mecânica	F-32/Q-32	310	410
	F-35/Q-35	340	450
	Q-40	380	480
	Q-42	410	520
	Q-45	450	550
ABNT NBR 5920 / ABNT NBR 5921 Chapas finas e bobinas finas (a frio/a quente), de aço de baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica	CFR 400	---/250	---/380
	CFR 500	310/370	450/490
ABNT NBR 7008 / ABNT NBR 7013 / ABNT NBR 14964 Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico <sup>b</sup>	ZAR 250	250	360
	ZAR 280	280	380
	ZAR 320	320	390
	ZAR 345	345	430
	ZAR 400	400	450

Elástica ( $\sigma_{cr}$ )  
(solução analítica para alguns casos (G))

Perfis com dupla simetria

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

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

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$





# Análise de Flambagem

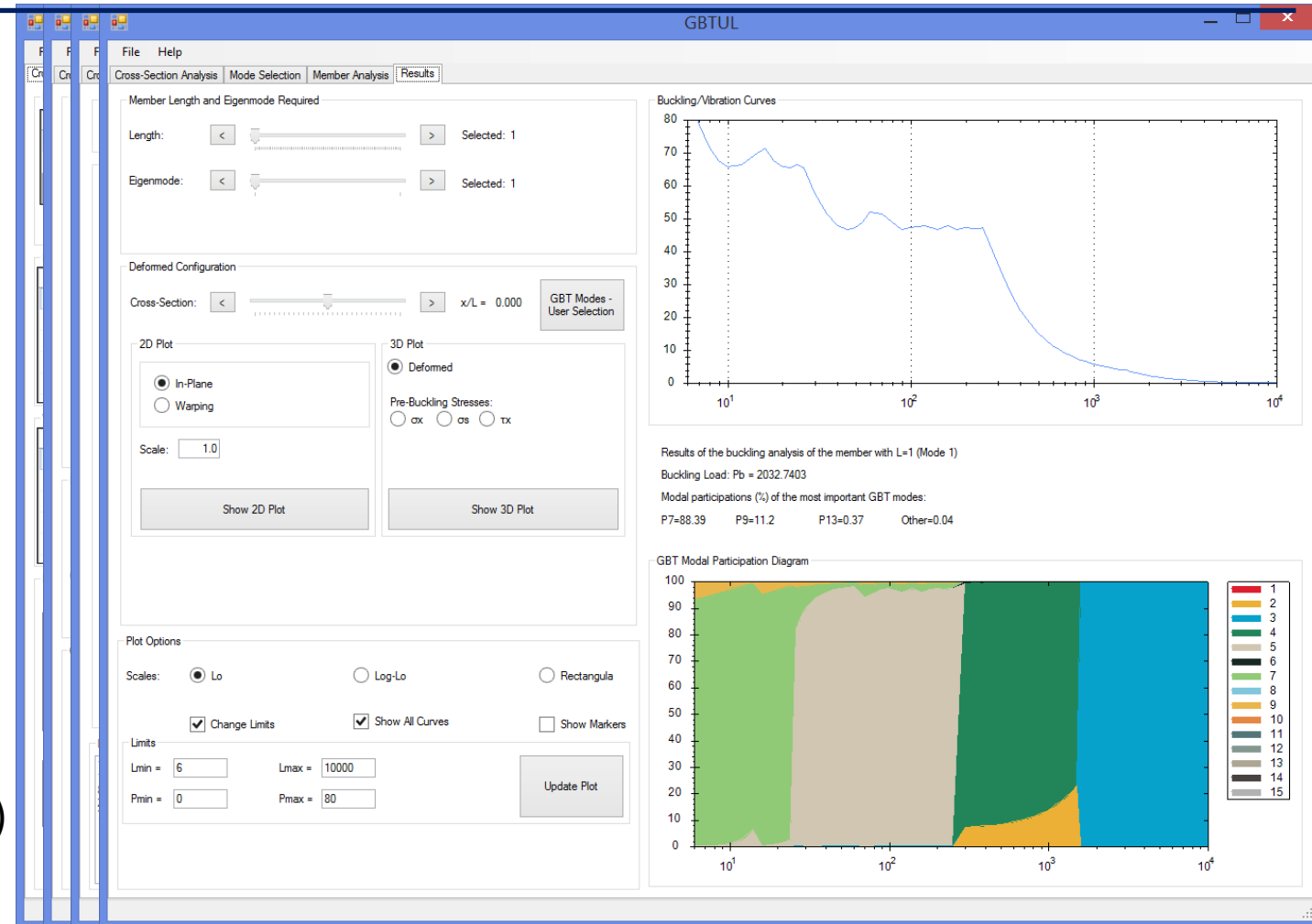


# Análise de Flambagem (1/2)

## Programa – GBTUL (GBT + UL)



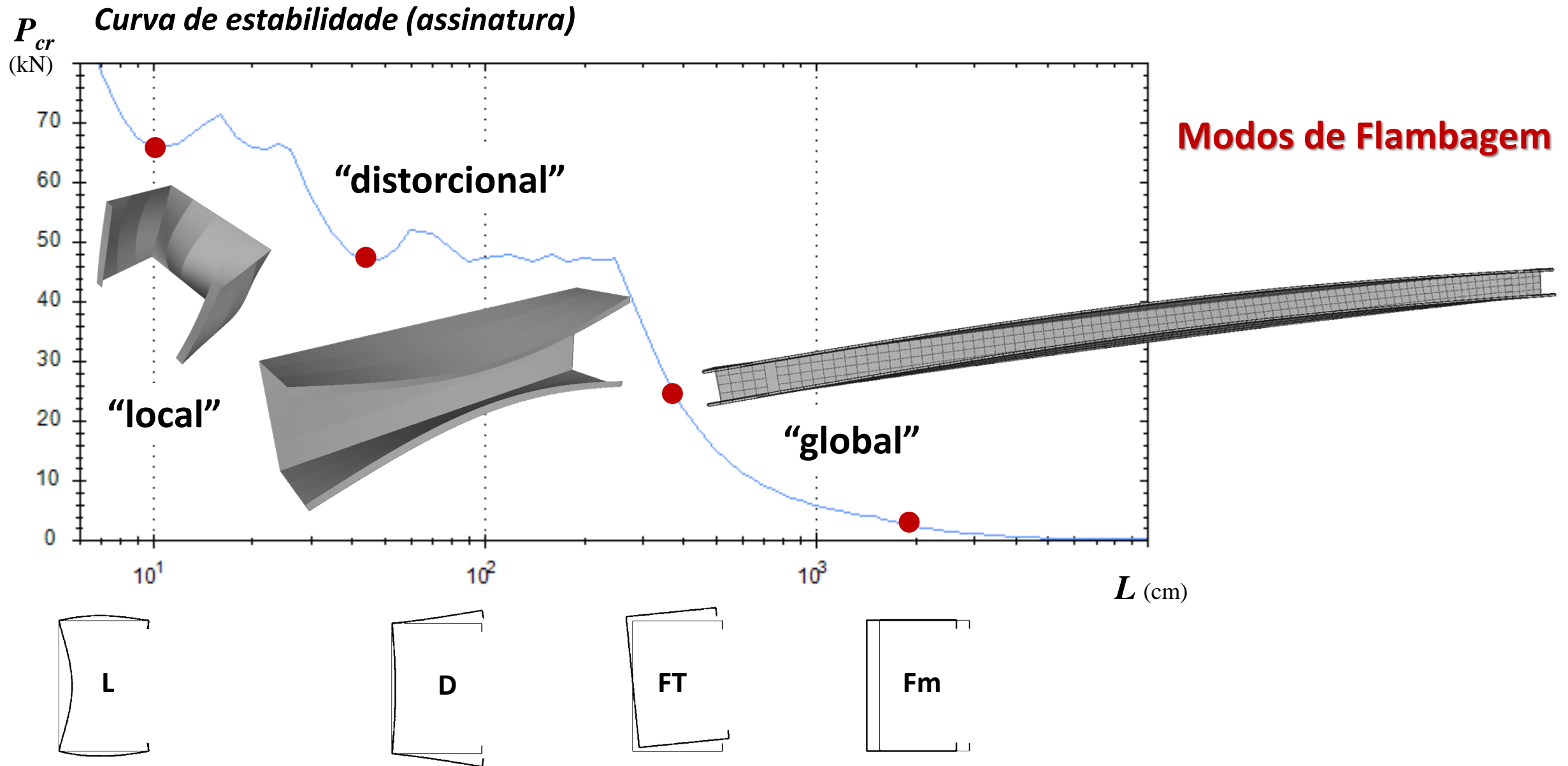
- Livre acesso – *Teoria Generalizada de Vigas* (GBT)
- Análise de flambagem elástica (bifurcação)  
Membros prismáticos de *parede fina*
- Diferentes materiais/apoios
- Características “únicas” → modos de deformação  
Aprofundamento “mecânico do problema”



4 etapas:

- 1) Definição de geometria e material(is)
- 2) Seleção dos modos
- 3) Elemento: comp+apoios+carregamento
- 4) Resultados

# Análise de Flambagem (2/2)





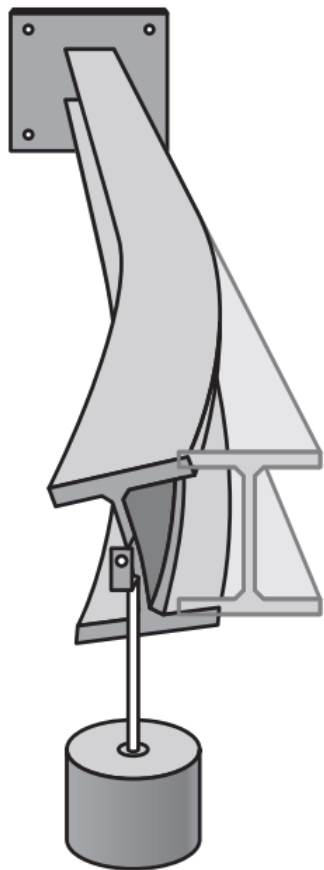


# Estudo de Caso - FLT

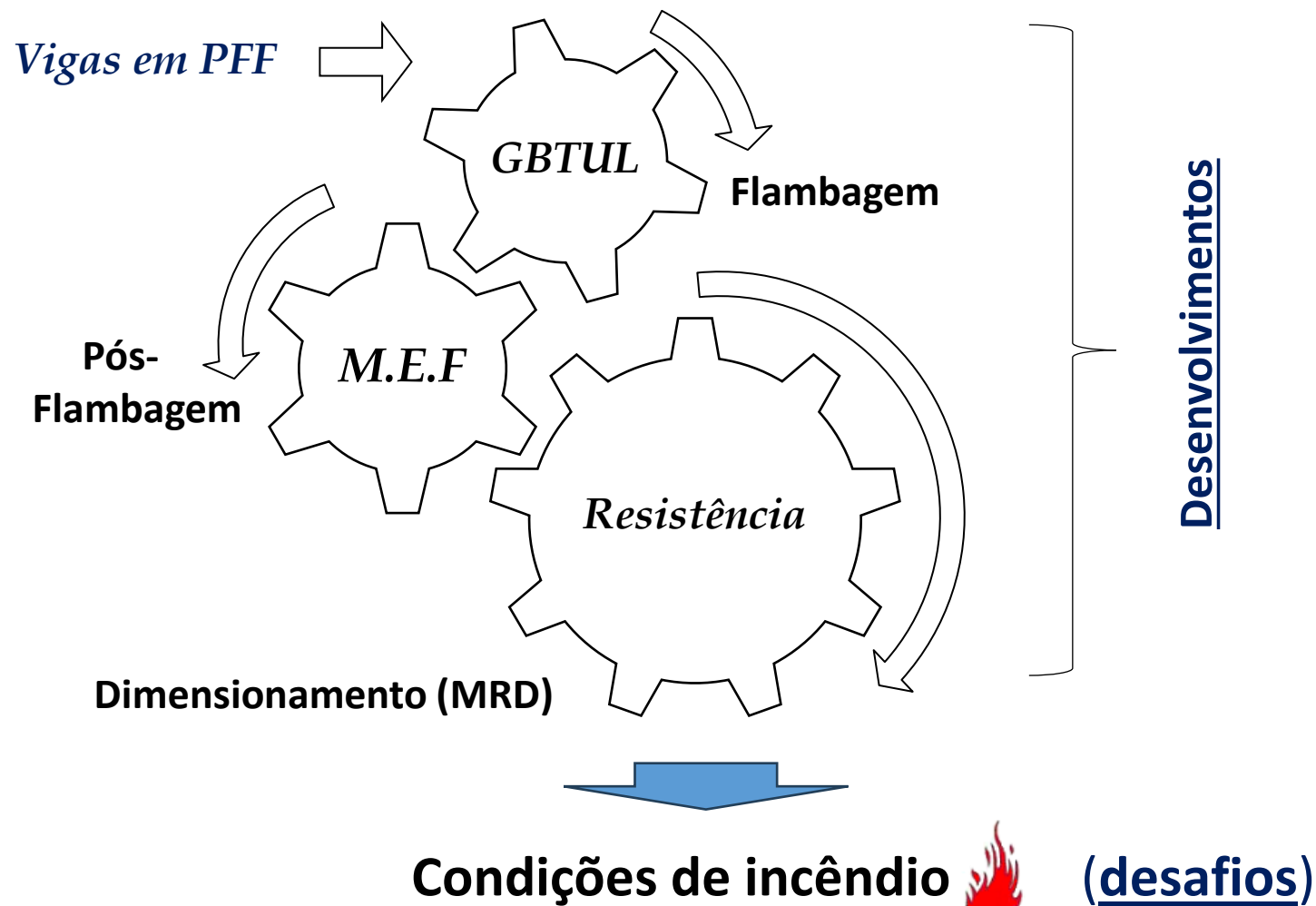


# Estudo de Caso

## Vigas em PFF sob modo de Flambagem/Falha Lateral com Torção (FLT)



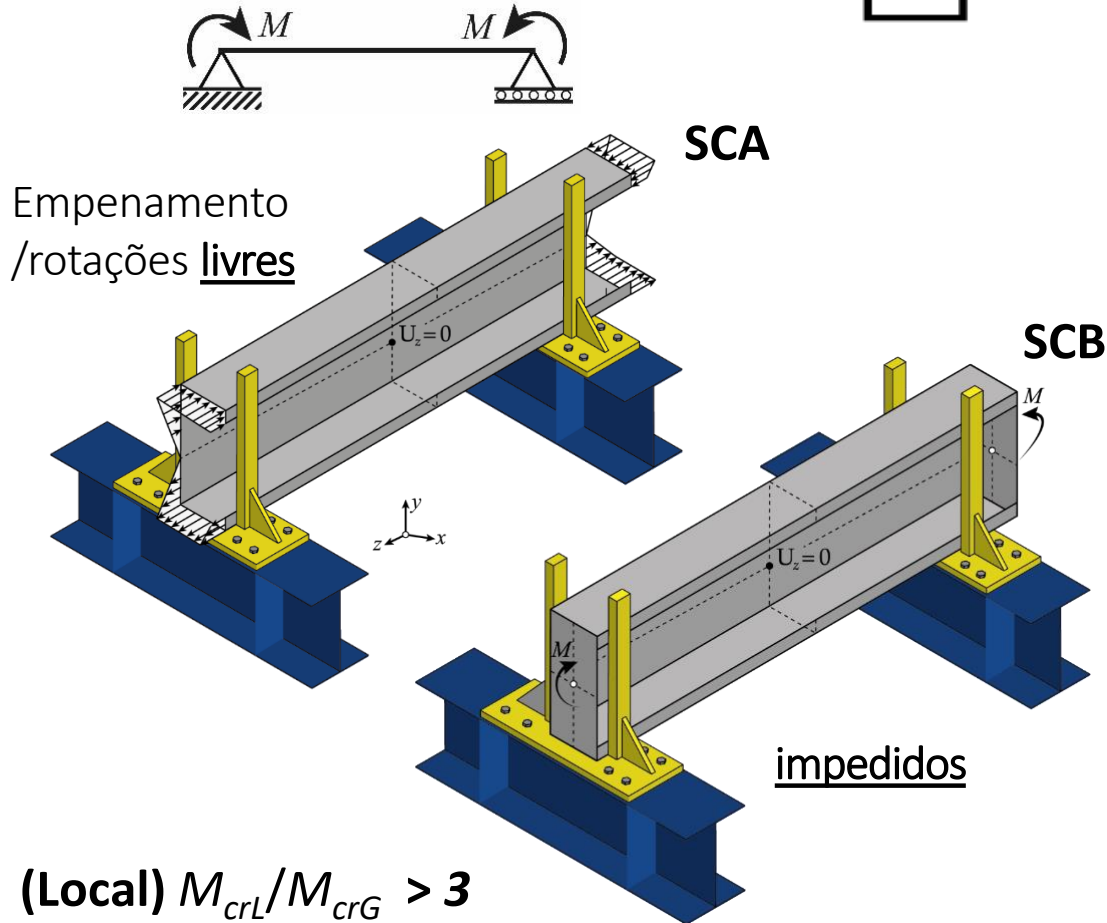
FLT: combinação de flexão lateral e torção





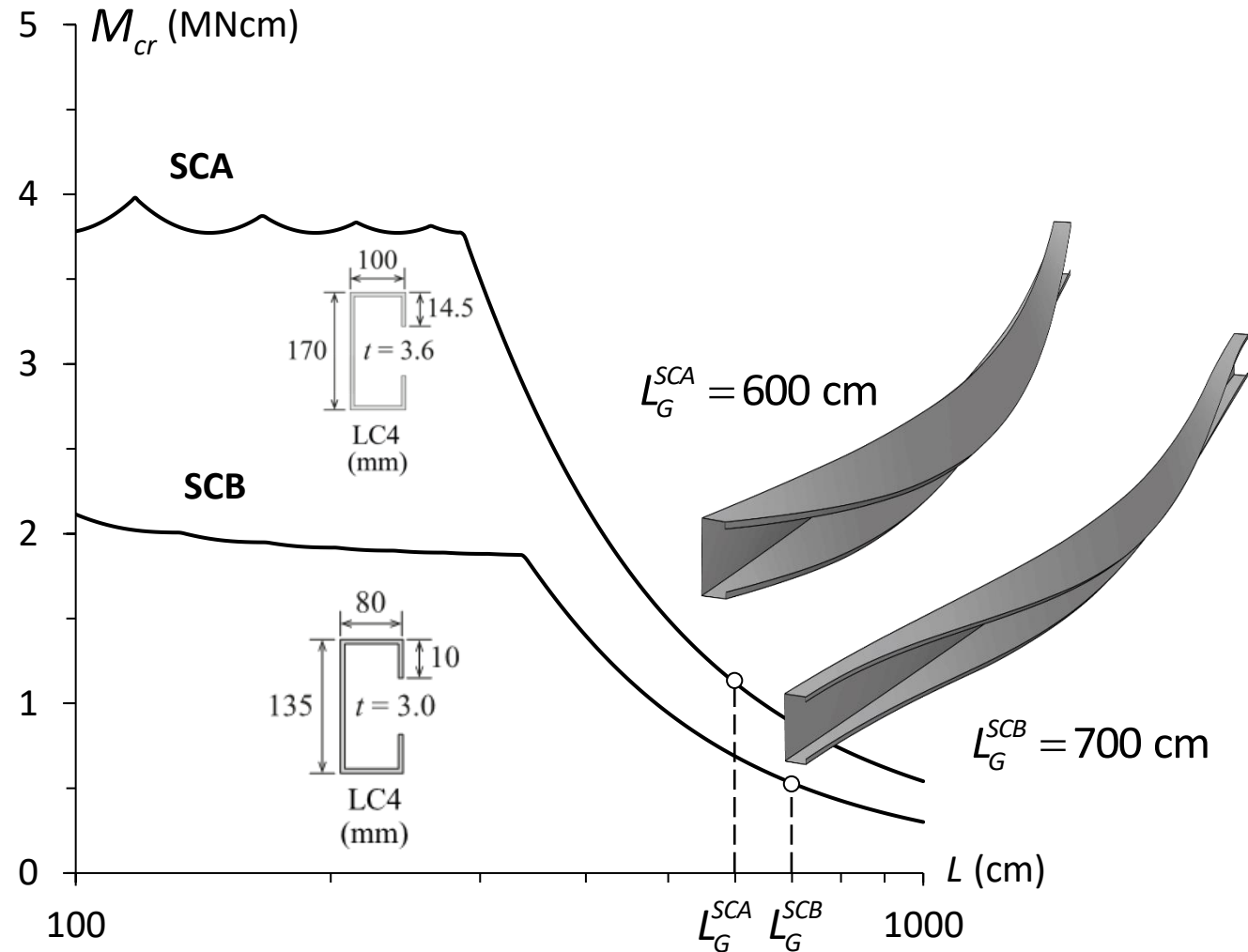
# Análise de Flambagem (GBTUL)

## 21 Seções Vigas em PFF seção Ue



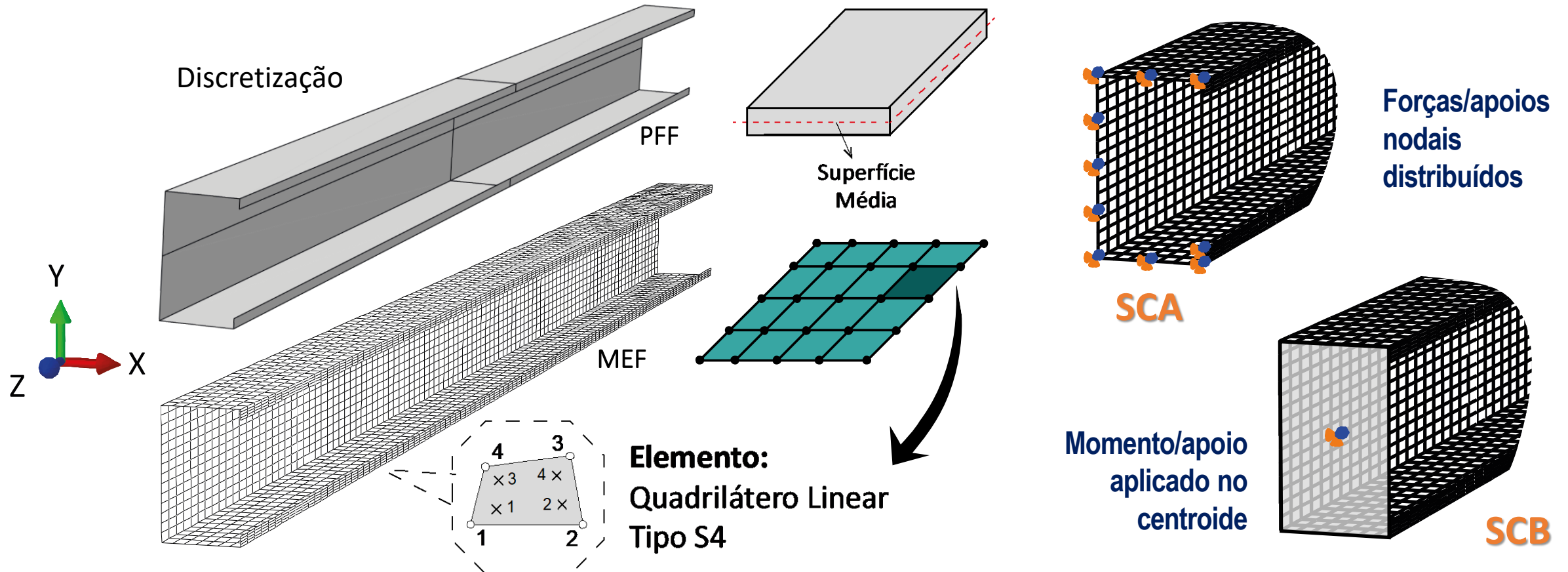
(Local)  $M_{crL}/M_{crG} > 3$

(Distortional)  $M_{crD}/M_{crG} > 2$



# Modelo Numérico (FEM)

## Comportamento pós-flambagem e resistência última de vigas sob FLT





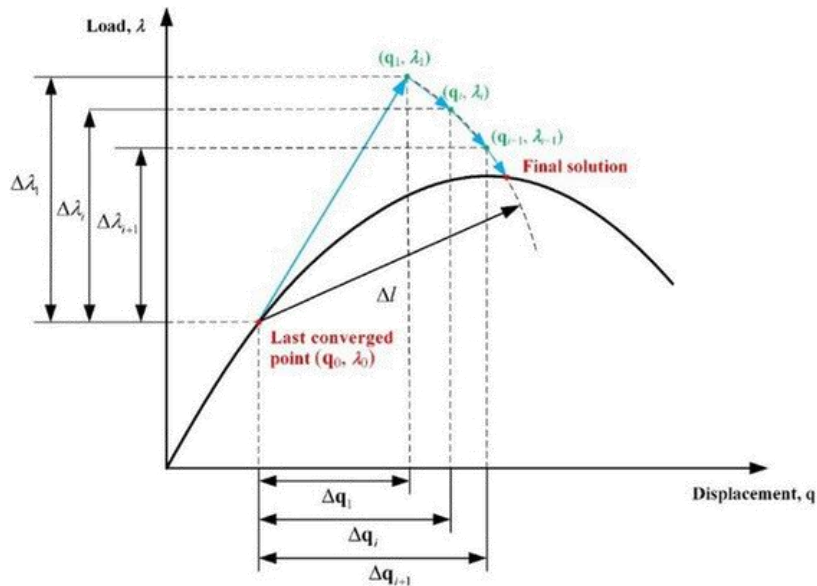
# Modelo Numérico (FEM)

## Comportamento pós-flambagem e resistência última de vigas sob FLT



→ G.M.N.I.A.

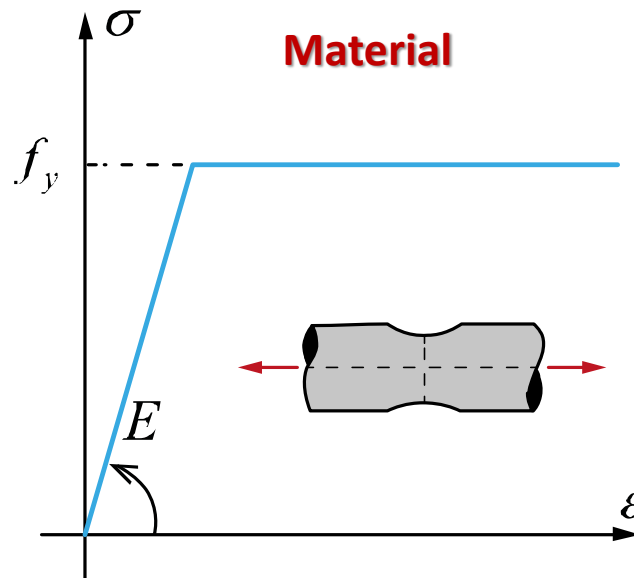
Não-Linear



Solução: Arc-length

DOI: 10.1007/s11071-021-06766-9

Material



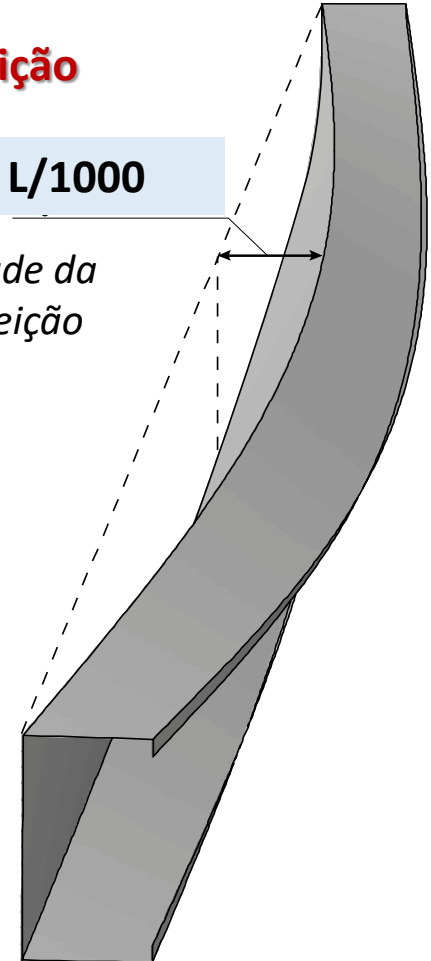
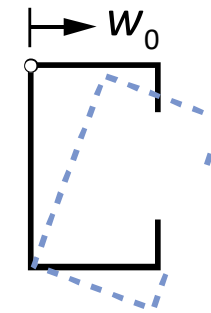
Elastoplástico Perfeito

Modelo Constitutivo do Aço

Imperfeição

$$w_0 = L/1000$$

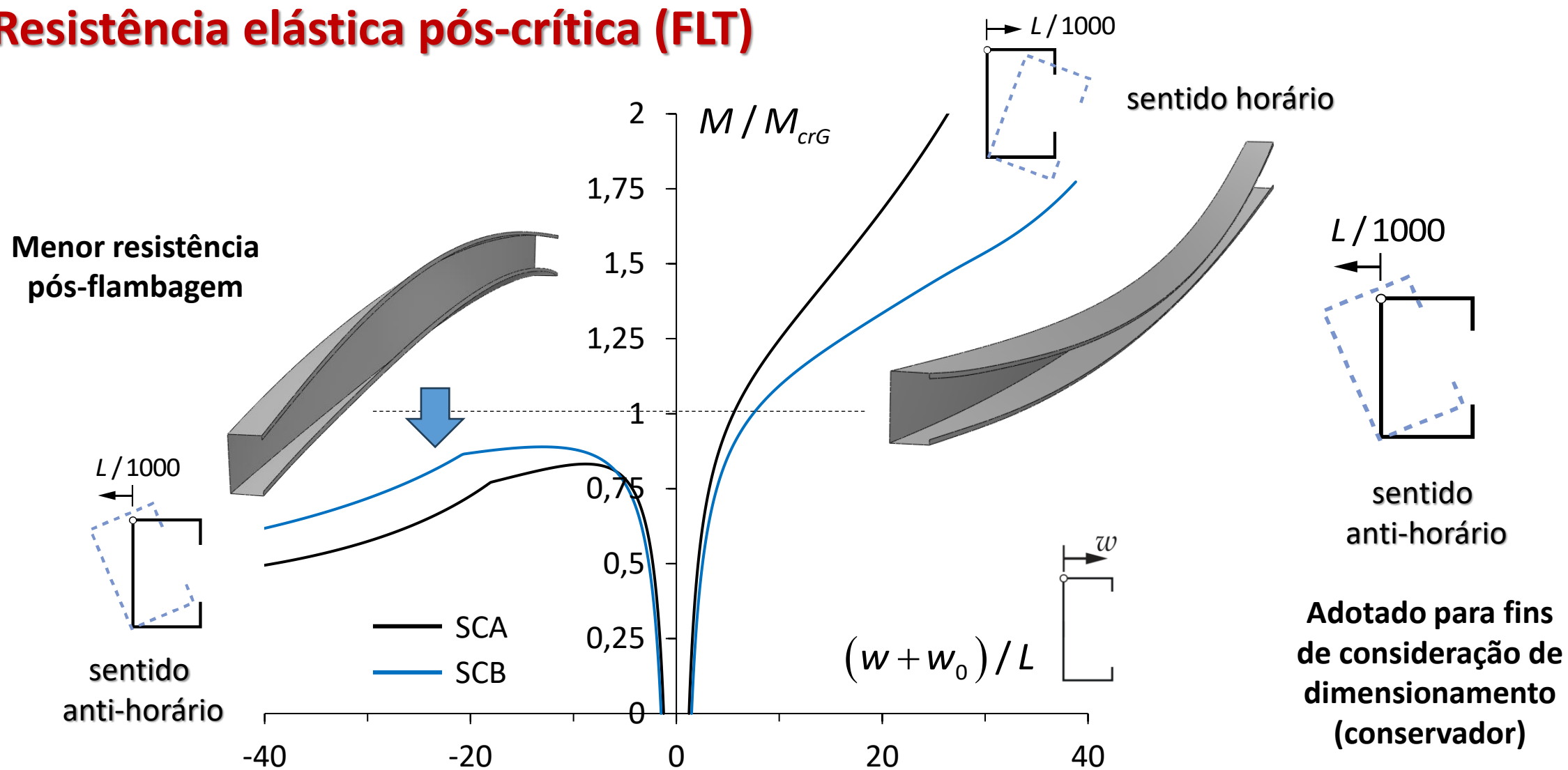
Amplitude da imperfeição



Imperfeição Geométrica Inicial

# Modelo Numérico (FEM)

## Resistência elástica pós-crítica (FLT)

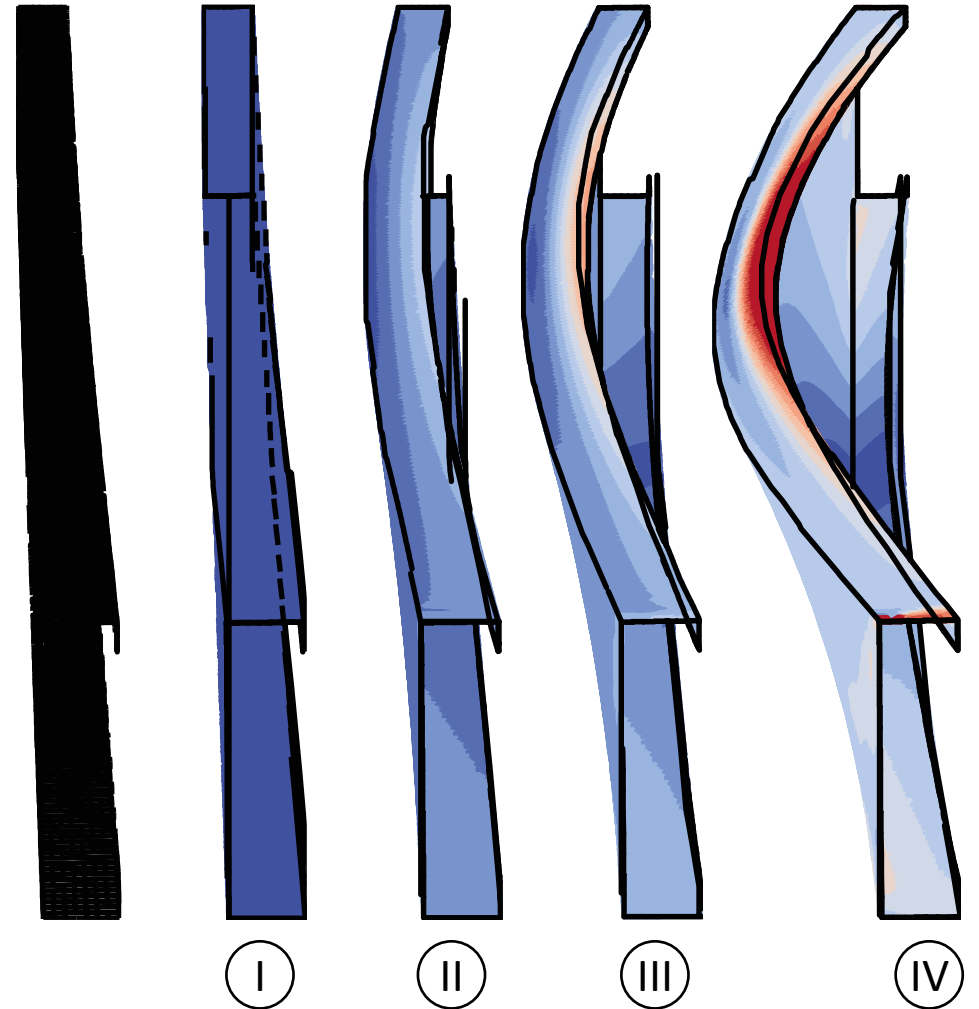
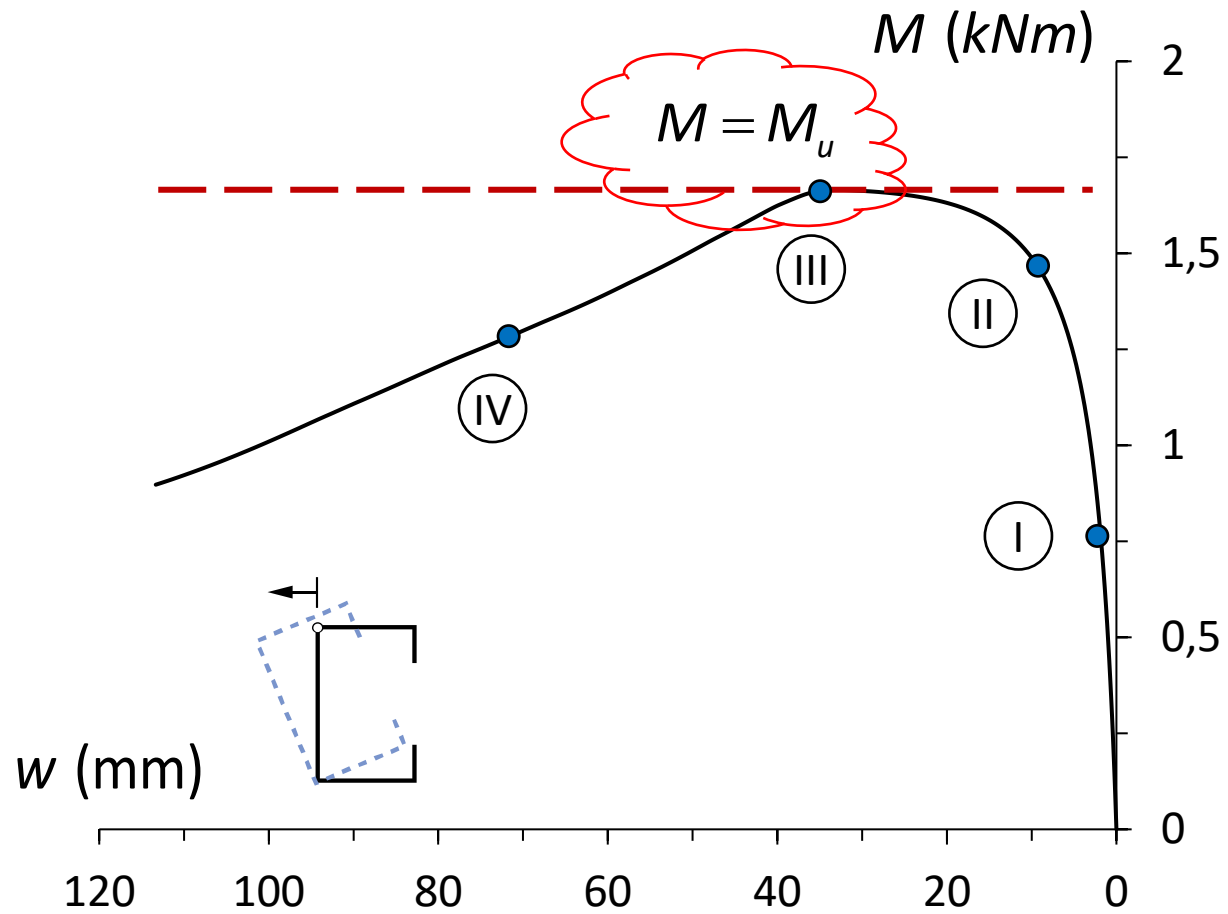


Trajétórias de equilíbrio: **influência da direção da imperfeição no comportamento**



# Modelo Numérico (FEM)

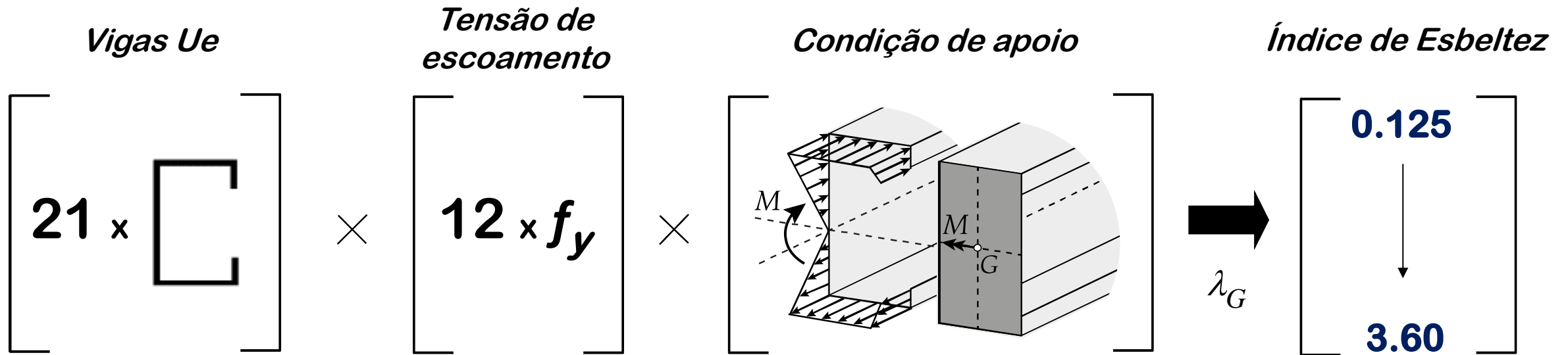
Resistência EP pós-crítica (FLT)  $\rightarrow M_u$



Trajétórias de equilíbrio elastoplásticas: exemplo ilustrativo de SCA

# Considerações sobre dimensionamento via MRD

## Estudo paramétrico



Número Total de Simulações Realizadas ( $M_u$ ):

**504**



# Considerações sobre dimensionamento via MRD

NORMA  
BRASILEIRA

ABNT NBR  
14762

Segunda edição  
09.07.2010

Válida a partir de  
09.08.2010

Dimensionamento de estruturas de aço  
constituídas por perfis formados a frio

*Design of cold-formed steel structures*

## Anexo C: Método da Resistência Direta

### C.4 Barras submetidas à flexão simples

O valor característico do momento fletor resistente  $M_{Rk}$  deve ser tomado como o menor valor calculado para flambagem global, local e distorcional,  $M_{Re}$ ,  $M_{Rl}$ ,  $M_{Rdist}$ , respectivamente, os quais devem ser calculados conforme apresentado em C.4.1 a C.4.3. O momento fletor resistente de cálculo  $M_{Rd}$  é dado por  $M_{Rk} / \gamma$ , onde  $\gamma$  é igual a 1,10.

#### C.4.1 Flambagem lateral com torção

$$M_y = W f_y$$

Momento início  
de plastificação

Plasticidade

Estabilidade

Resistência

**$M_u$  vs.  $M_{nG}$  ?**

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{M_y}{M_e}}$$

*Esbeltez Global*

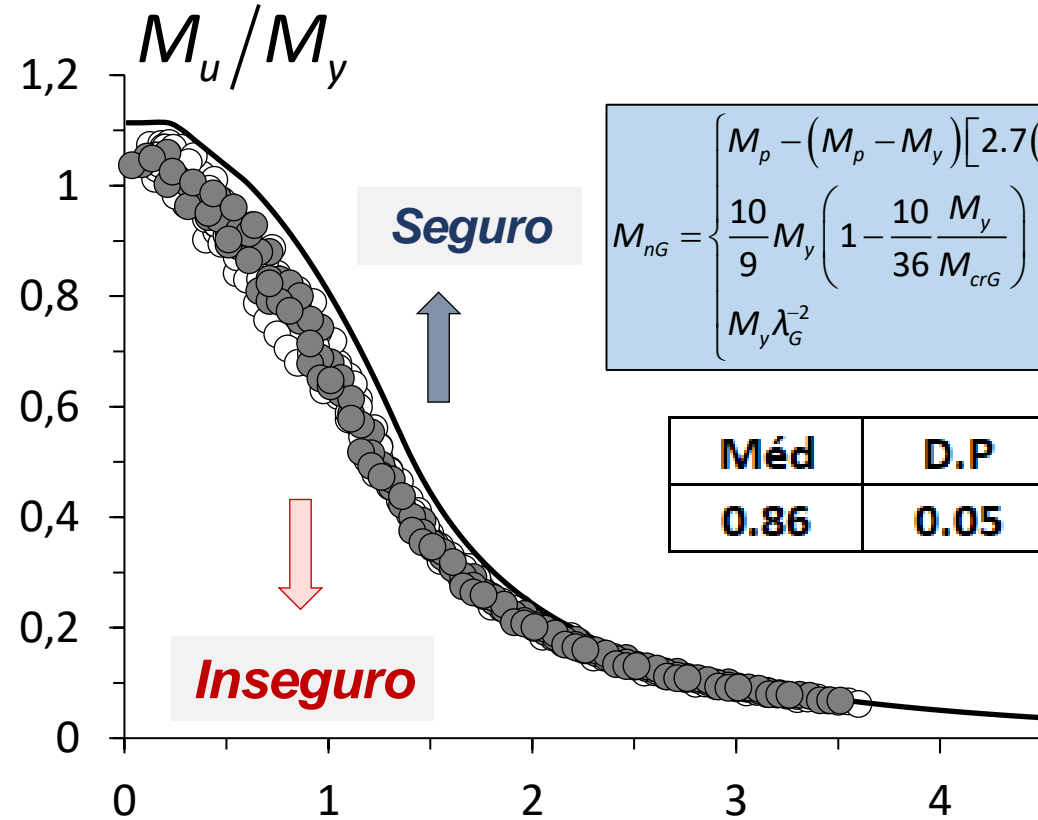
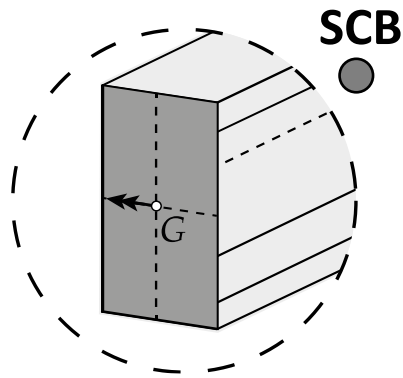
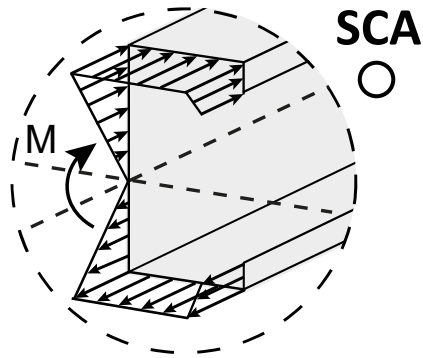
$$M_{nG} = \begin{cases} M_p - (M_p - M_y) [2.7(\lambda_G - 0.23)] & \lambda_G \leq 0.6 \\ \frac{10}{9} M_y \left( 1 - \frac{10}{36} \frac{M_y}{M_{crG}} \right) & 0.6 < \lambda_G < 1.336 \\ M_y \lambda_G^{-2} & \lambda_G \geq 1.336 \end{cases}$$

$M_p =$  Momento Plástico ( $Z f_y$ )

# Considerações sobre dimensionamento via MRD

## Dados resistência última ( $M_u$ )

504

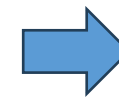


$$M_{nG} = \begin{cases} M_p - (M_p - M_y)[2.7(\lambda_G - 0.23)] & \lambda_G \leq 0.6 \\ \frac{10}{9} M_y \left( 1 - \frac{10}{36} \frac{M_y}{M_{crG}} \right) & 0.6 < \lambda_G < 1.336 \\ M_y \lambda_G^{-2} & \lambda_G \geq 1.336 \end{cases}$$

Méd	D.P	Mín	Máx
0.86	0.05	0.74	0.97

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{M_y}{M_e}}$$

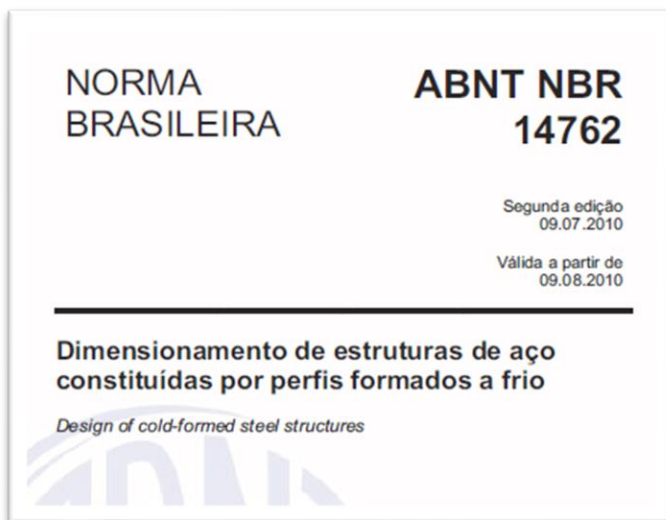
**Estimativas inseguras para os casos analisados**  
(também observado por outros pesquisadores)



**Aprimorar curva**  
**dimensionamento**

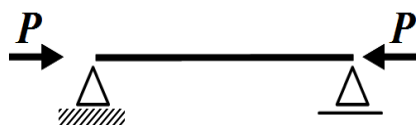


# Considerações sobre dimensionamento via MRD



## Anexo C: Método da Resistência Direta

### C.3.1 Colunas sob flambagem GLOBAL (flexão, torção ou flexo-torção)



$$P_{nG} = \begin{cases} P_y (0.658)^{\lambda_G^2} & \lambda_G \leq 1.5 \\ P_y \left( \frac{0.877}{\lambda_G^2} \right) & \lambda_G > 1.5 \end{cases}$$

$$\lambda_G = \sqrt{\frac{P_y}{P_e}}$$

### (Proposta) C.4.1 Vigas sob flambagem GLOBAL (FLT)



$$a = (b \cdot W / Z)^{0.544}$$

$$b = 0.790 \text{ (SCA) ou } 0.853 \text{ (SCB)}$$

$$M_{nLT} = \begin{cases} M_p (0.643 \cdot a)^{\lambda_G^{1.5}} & \lambda_G \leq 1.5 \\ M_y \left( \frac{b}{\lambda_G^2} \right) & \lambda_G > 1.5 \end{cases}$$

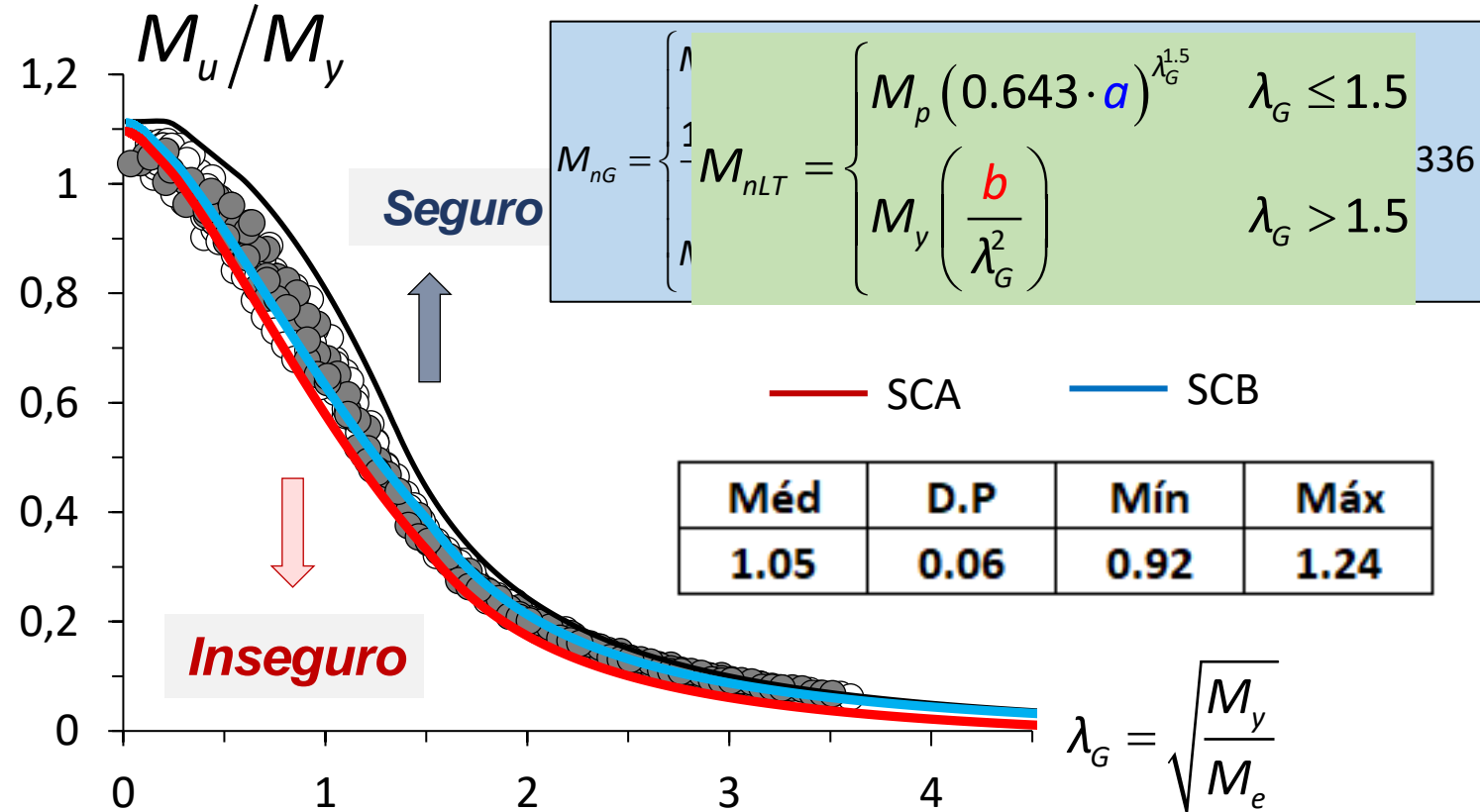
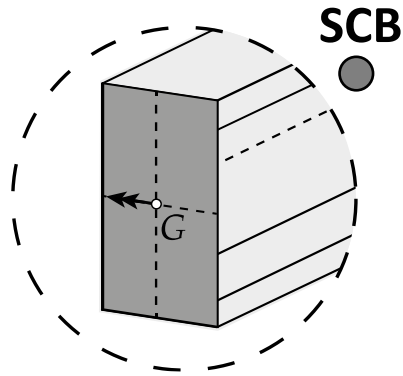
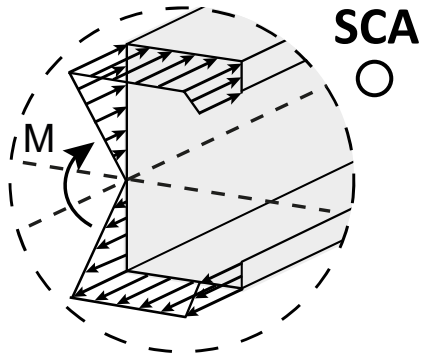
$$\lambda_G = \sqrt{\frac{M_y}{M_e}}$$

$M_p =$  Momento Plástico ( $Z f_y$ )

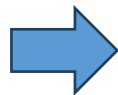
# Considerações sobre dimensionamento via MRD

## Dados resistência última ( $M_u$ )

**504**



**Estimativas Seguras para os casos analisados**



**Curva é válida para temperaturas elevadas?  
MRD prevê somente temperatura ambiente**





# Condições de Incêndio



# Condições de Incêndio

NORMA  
BRASILEIRA

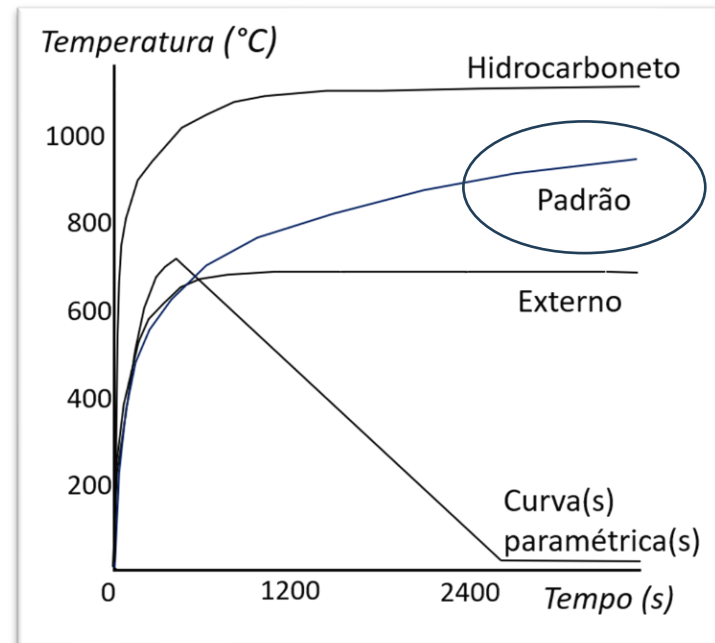
ABNT NBR  
14323

Segunda edição  
14.08.2013  
Válida a partir de  
14.09.2013

Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio

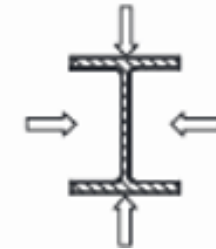
## Seção 10: Métodos avançados de dimensionamento

(1) Temperatura no ambiente



(2) Temperatura nos elementos

$$\frac{u}{A_g} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$$



$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{(u/A)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t$$

(3) Combinação de ações

ELU: Combinações Últimas Excepcionais

$$\sum_{i=1}^n \underset{\text{permanentes}}{\gamma_{gi}} F_{Gi,k} + \underset{\text{térmicas}}{F_{Q,exc}} + 0,21 \underset{\text{variáveis}}{F_{Q,k}}$$

(4) Segurança para o TRRF

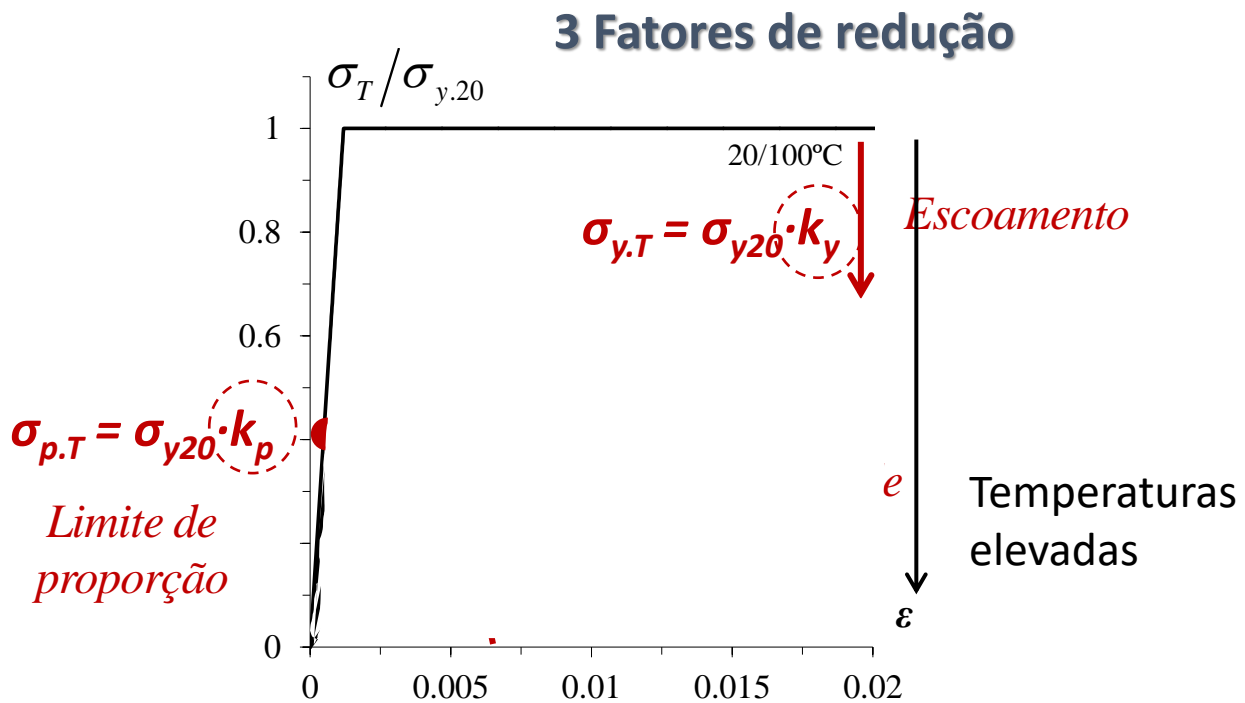
$$\frac{R}{\gamma} \geq \psi S$$

Resistência do aço com a temperatura

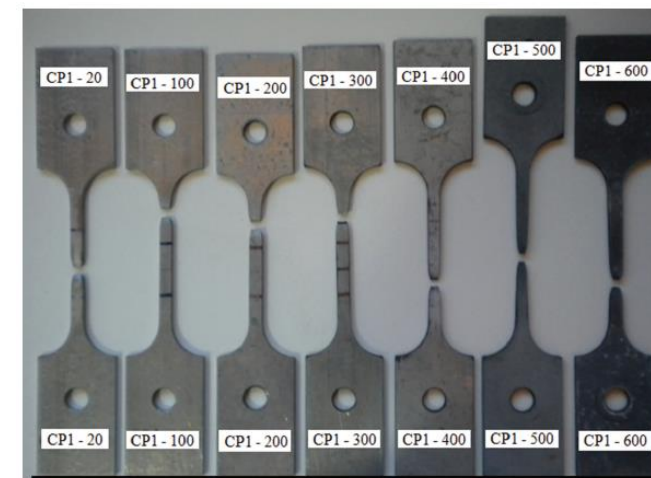
# Comportamento Termomecânico

Propriedades mecânicas dos **aços estruturais** para condições de incêndio

*Diagrama tensão-deformação-temperatura*



$k_y, k_e$  &  $k_p$  são tabulados em função da temperatura

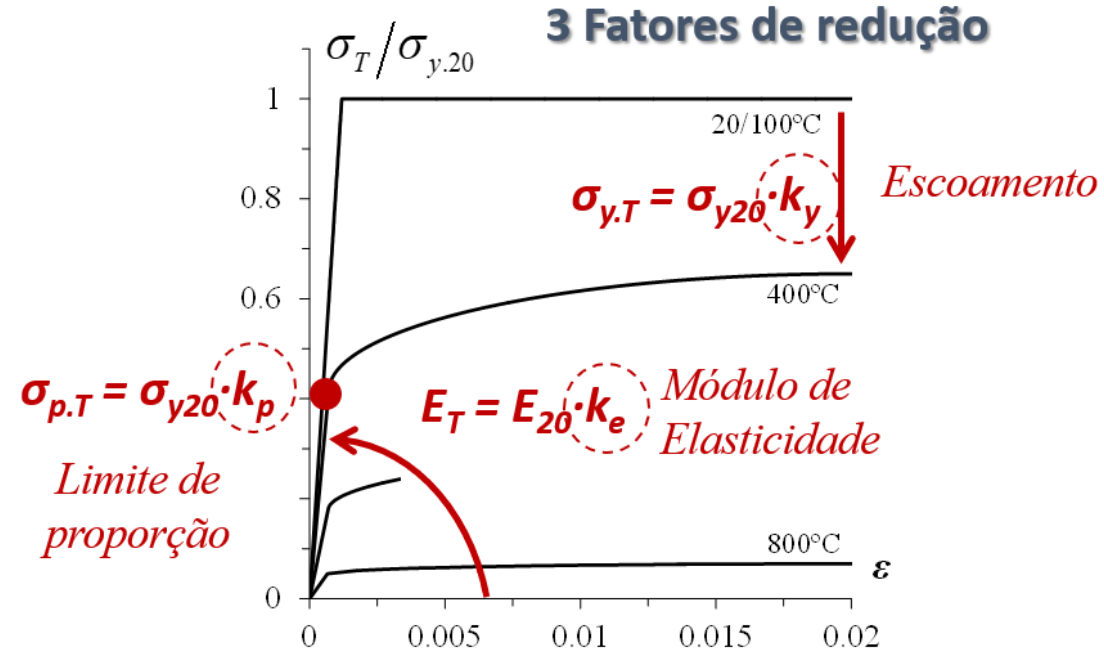




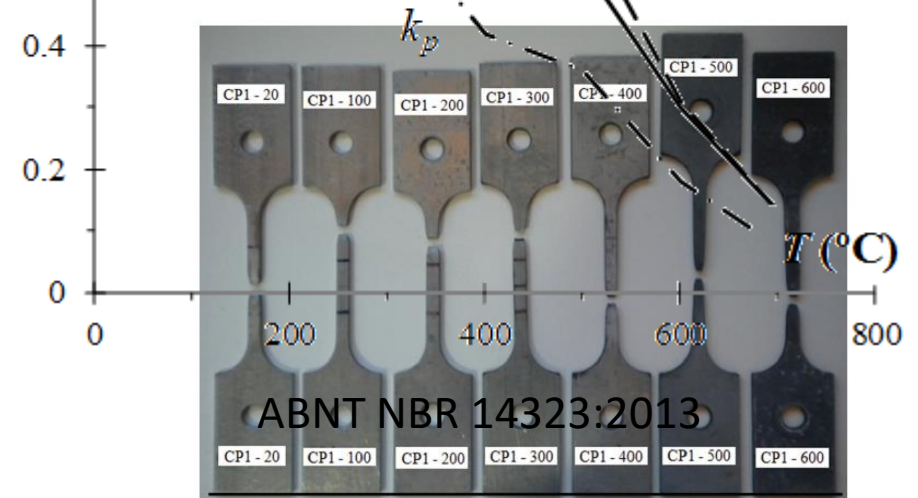
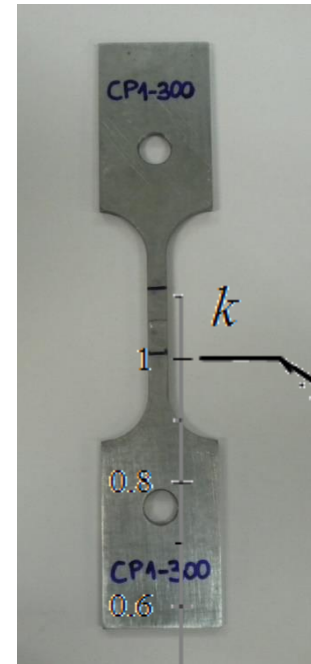
## 2. Comportamento Termomecânico

Propriedades mecânicas dos **aços estruturais** para condições de incêndio

*Diagrama tensão-deformação-temperatura*



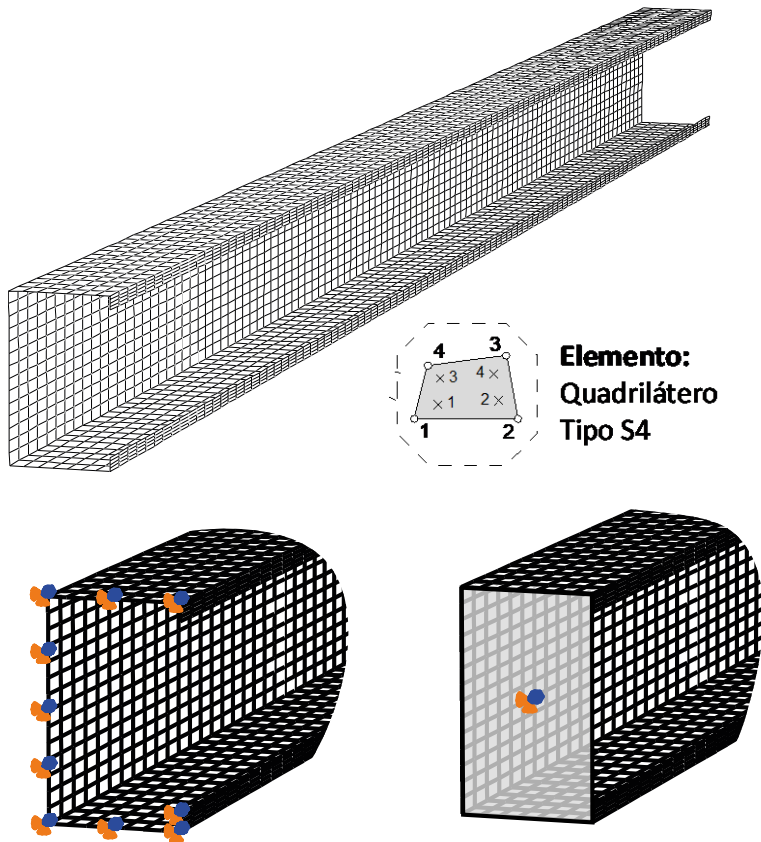
$k_y$ ,  $k_e$  &  $k_p$  são tabulados em função da temperatura

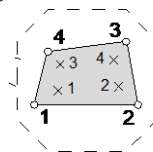


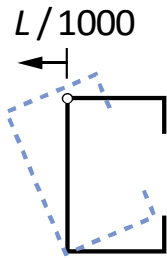
# Modelo Numérico (FEM)

## Comportamento PF e $M_u$ vigas sob FLT + “temperaturas elevadas”

 → **G.M.N.I.A.**



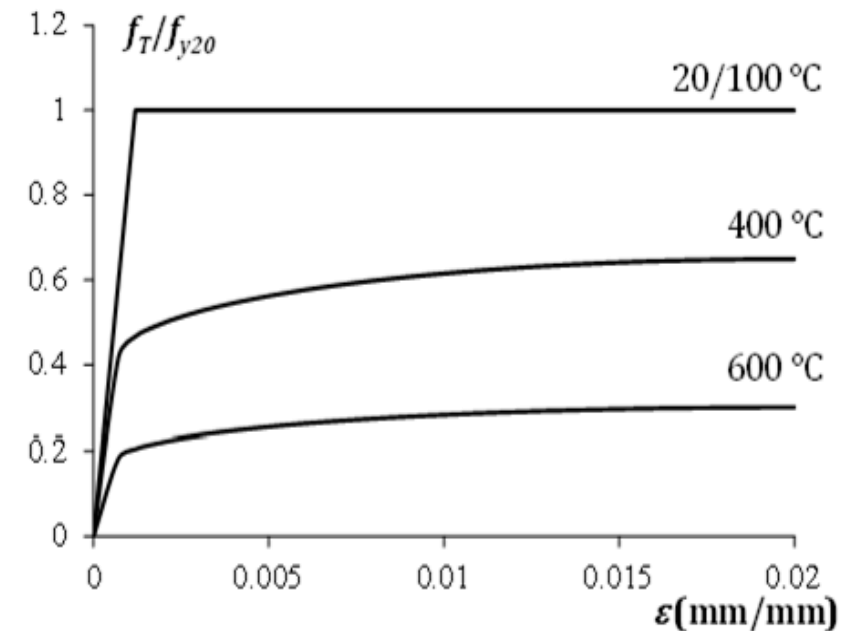
 **Elemento:**  
Quadrilátero  
Tipo S4

$L/1000$   




**Menor resistência pós-crítica**

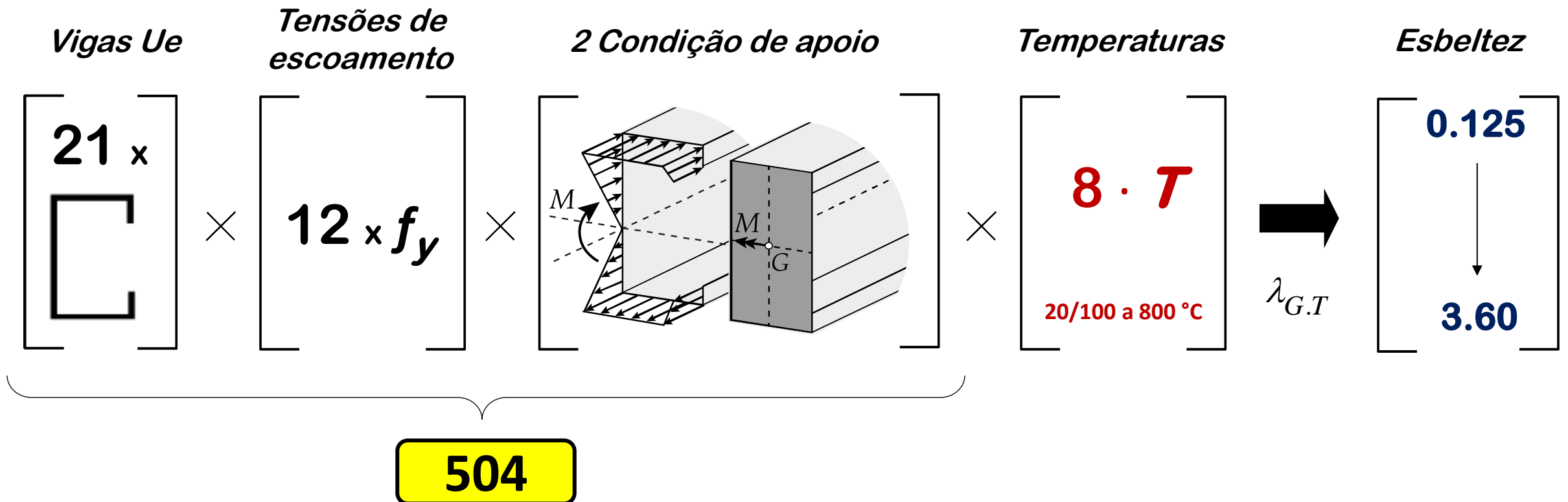
**Relações constitutivas do aço segundo ABNT NBR 14323 (EC3.p1.2 (2005))**



SFEM of Arrais *et al.* (FSJ, 2021) + French National Annex

# Considerações sobre dimensionamento via MRD

## Estudo paramétrico para temperaturas elevadas



Número Total de Simulações Realizadas ( $M_{u.T}$ ):

**4032**



# Considerações sobre dimensionamento via MRD

**Curva proposta para temperatura ambiente:**

$$M_{nLT} = \begin{cases} M_p (0.643 \cdot a)^{\lambda_G^{1.5}} & \lambda_G \leq 1.5 \\ M_y \left( \frac{b}{\lambda_G^2} \right) & \lambda_G > 1.5 \end{cases} \quad \lambda_G = \sqrt{\frac{M_y}{M_e}}$$

**para temperaturas elevadas:**

$$M_{nLT.T} = \begin{cases} M_{p.T} (0.643 \cdot a)^{\lambda_{G.T}^{1.5}} & \lambda_{G.T} \leq 1.5 \\ M_{y.T} \left( \frac{b}{\lambda_{G.T}^2} \right) & \lambda_{G.T} > 1.5 \end{cases}$$

$$\lambda_{G.T} = \sqrt{\frac{M_{y.T}}{M_{e.T}}}$$

**Momentos:**

$$M_{y.T} = M_{y.20} k_y \quad \text{Escoamento}$$

$$M_{e.T} = M_{e.20} k_E \quad \text{Crítico}$$

$$M_{y.T} = M_{y.20} k_y$$

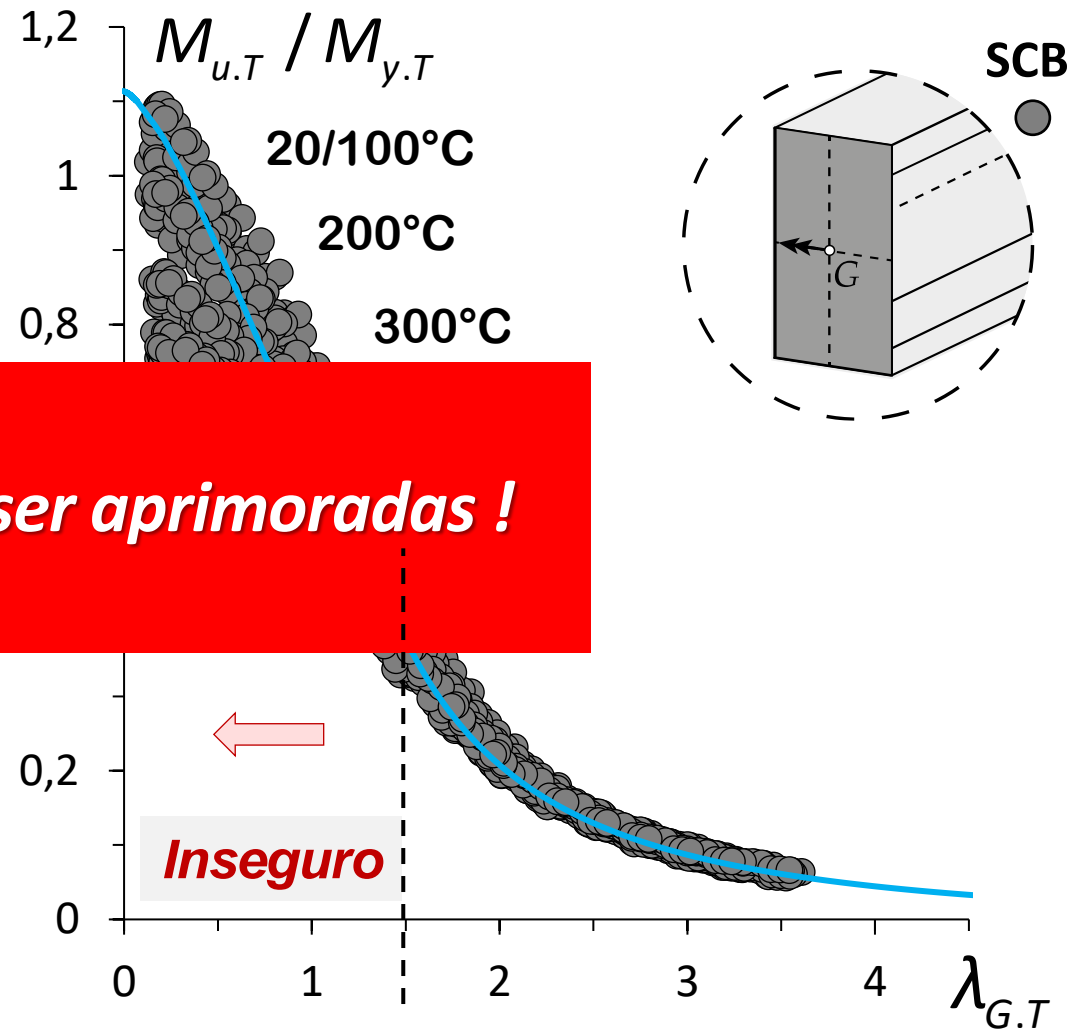
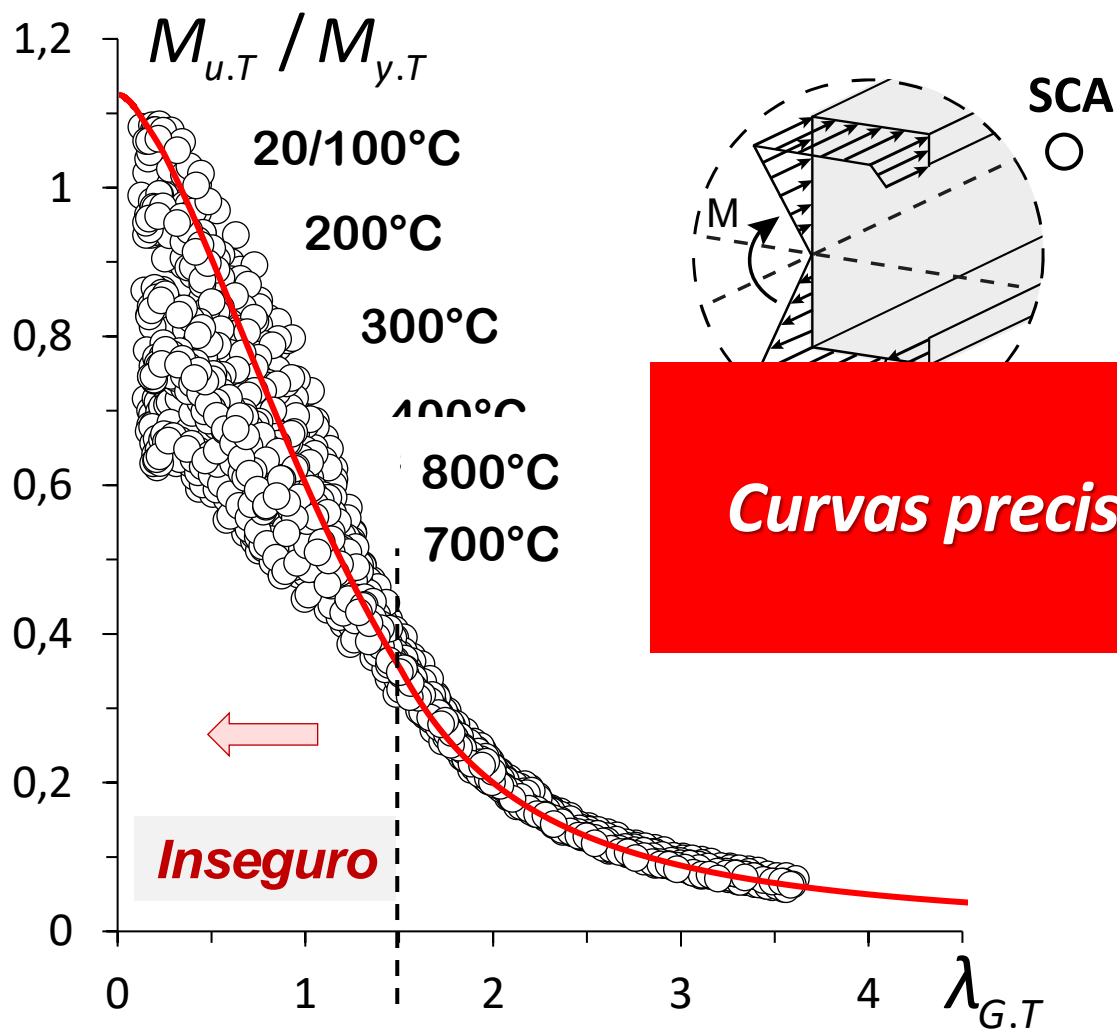
$$M_{p.T} = M_{p.20} k_y$$

Escoamento

Plástico

# Considerações sobre dimensionamento via MRD

## Dados da resistência última ( $M_{u.T}$ )



**Curvas precisam ser aprimoradas !**

# Considerações sobre dimensionamento via MRD

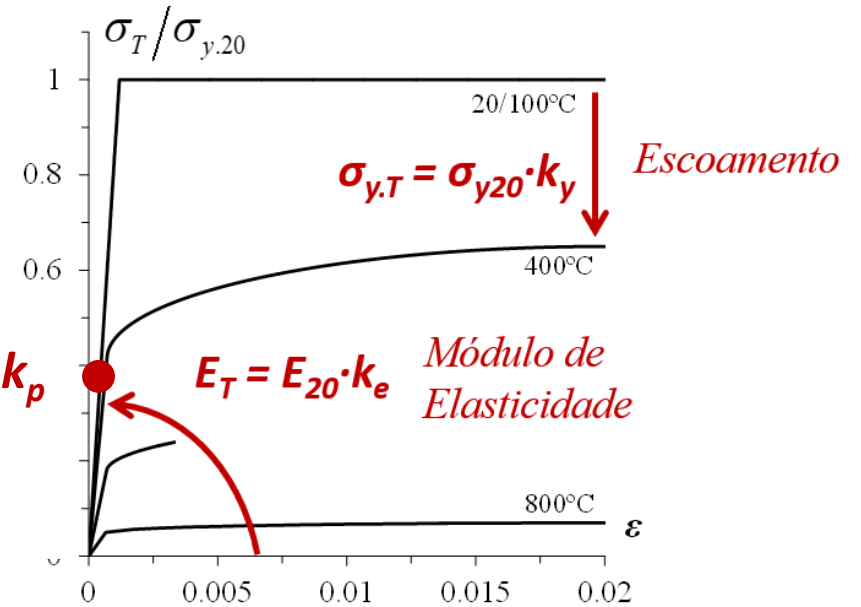
**Curva para temperaturas elevadas (proposta inicial) :**

$$M_{nLT.T} = \begin{cases} M_{p.T} (0.643 \cdot a)^{\lambda_{G.T}^{1.5}} & \lambda_{G.T} \leq 1.5 \\ M_{y.T} \left( \frac{b}{\lambda_{G.T}^2} \right) & \lambda_{G.T} > 1.5 \end{cases} \quad \lambda_{G.T} = \sqrt{\frac{M_{y.T}}{M_{e.T}}}$$

$$M_{p.T} = M_{p.20} k_y$$

$$M_{y.T} = M_{y.20} k_y$$

$$M_{e.T} = M_{e.20} k_E$$



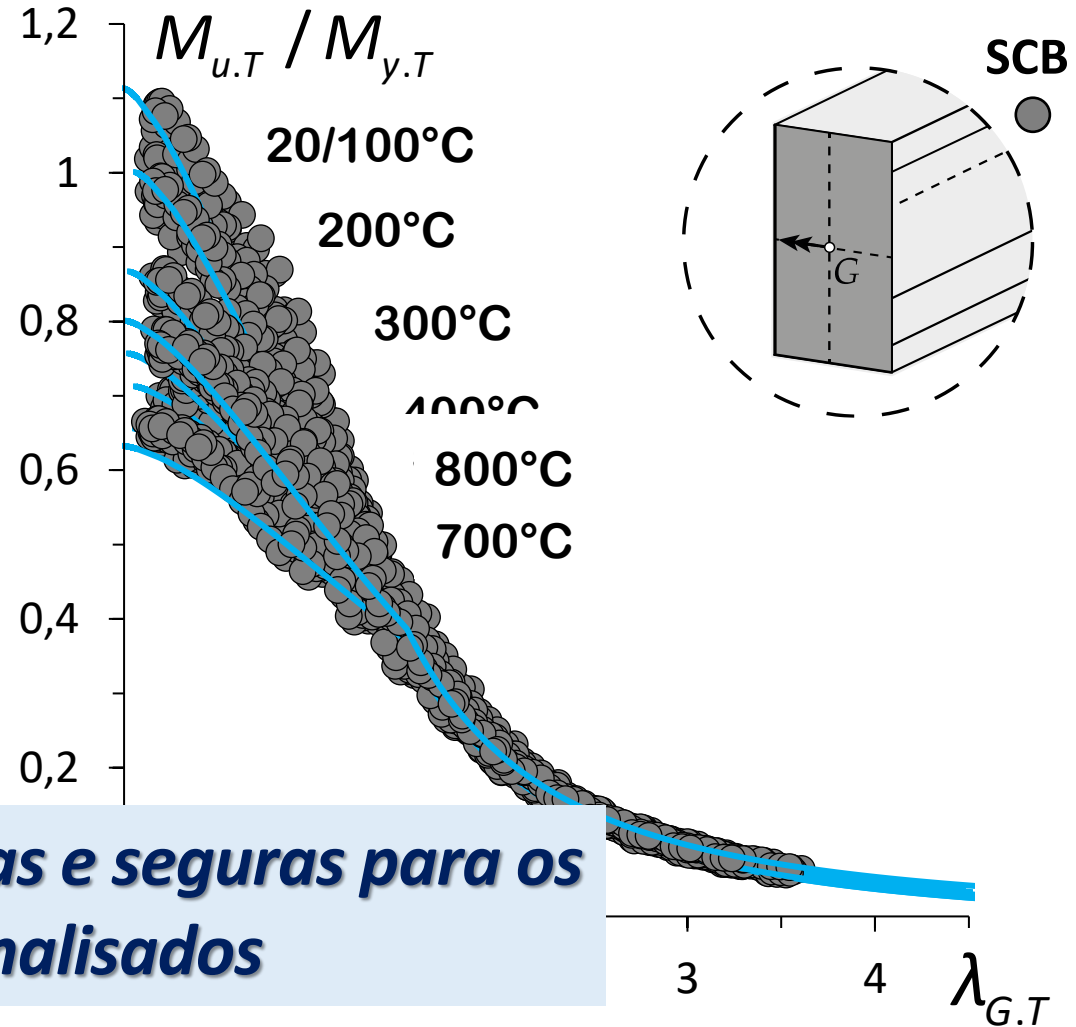
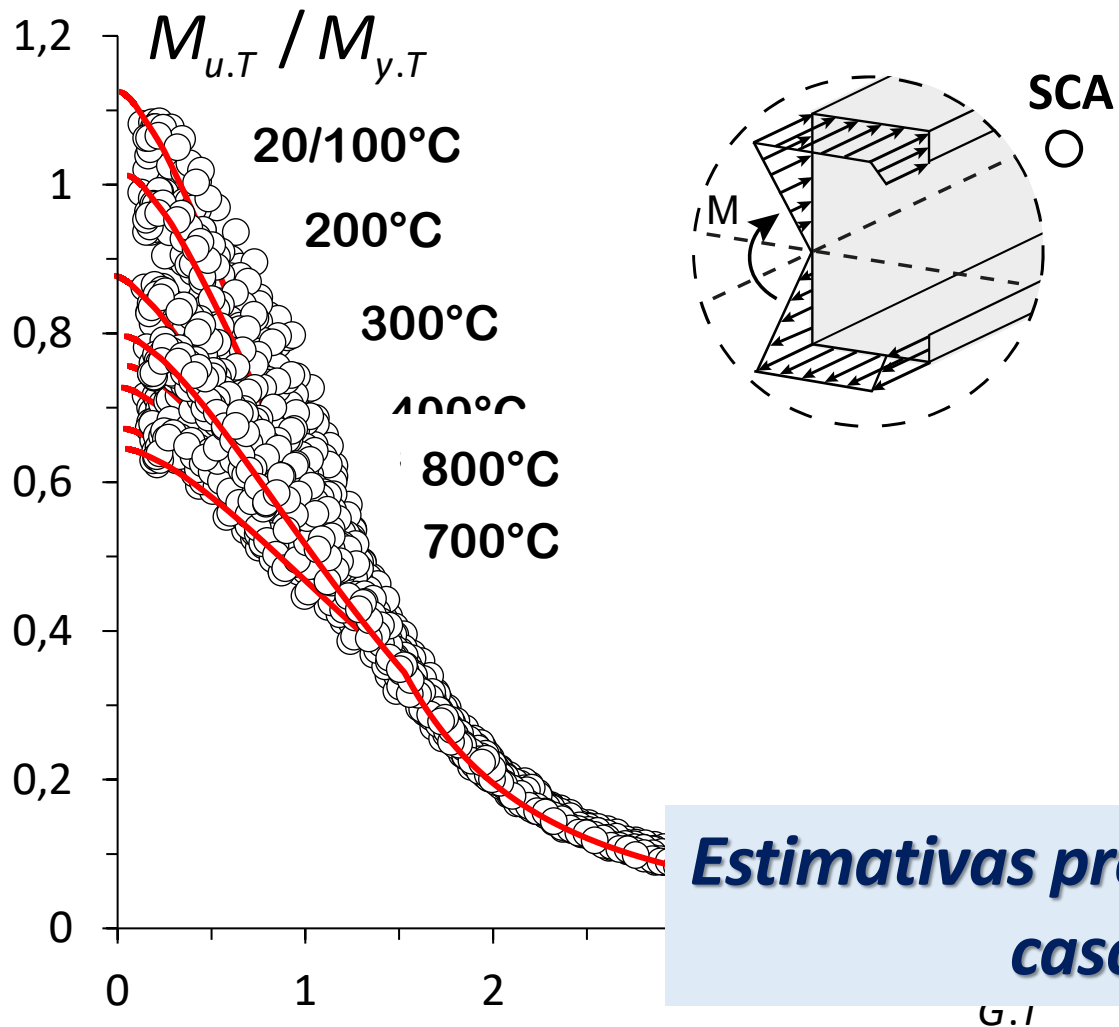
**para temperaturas elevadas (nova proposta):**

$$M_{nLT.T} = \begin{cases} M_{p.T} \left( \frac{k_p}{k_y} \right) (0.643 \cdot a)^{\lambda_{G.T}^{1.5}} & \lambda_{G.T} \leq 1.5 \\ M_{y.T} \left( \frac{b}{\lambda_{G.T}^2} \right) & \lambda_{G.T} > 1.5 \end{cases}$$



# Considerações sobre dimensionamento via MRD

## Dados da resistência última ( $M_{u.T}$ )



**Estimativas precisas e seguras para os casos analisados**



The background is a collage of various modern architectural structures, including bridges, walkways, and buildings with unique facades. A large, semi-transparent blue shape is overlaid on the center, containing the text.

# Considerações finais e agradecimentos



# Considerações finais

---

- Pesquisas em andamento sobre comportamento (via MEF) de flambagem, pós-flambagem, resistência última e dimensionamento via MRD de vigas em PFF sob flambagem/falha por FT para temperaturas ambiente e elevadas (incêndio).
- Com base no estudo paramétrico realizado, foi possível concluir que, **a atual curva (ABNT-NBR/AISI) forneceu estimativas inseguras para os casos propostos e analisados nos estudos desenvolvidos...**

→ modificações eram necessárias!

- Novas curvas foram propostas, que apesar da simplicidade, permitiram melhorar a qualidade e segurança das previsões, ambiente e incêndio.

**Próximos passos: mais dados MEF e validação experimental na COPPE/UFRJ.**



# Agradecimentos

---

- CBCA – pela oportunidade de congregar o presente evento.
- Agências de fomento brasileiras (CAPES, CNPq e FAPERJ) que permitiram viabilizar os trabalhos de pesquisa apresentados e bolsas aos alunos.
- Alunos e pesquisadores envolvidos.
- Instituições, COPPE/UFRJ.

## *Comportamento, Resistência e Dimensionamento de Perfis de Aço Formados a Frio: Desenvolvimentos e Desafios*

---

**Muito obrigado !**



**Alexandre Landesmann**

Professor Titular  
Dep. Estruturas - DE/FAU  
Lab. Estruturas - LABEST/PEC/COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

**[alandes@coc.ufrj.br](mailto:alandes@coc.ufrj.br)**



Alexandre

Contato do WhatsApp

