



VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional

Universidade de Évora

14 a 16 de Abril de 2003

## MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE VIGAS METÁLICAS COM DESLOCAMENTO AXIAL RESTRINGIDO, EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Lopes, N.<sup>1</sup>, Simões da Silva, L.<sup>2</sup>, Vila Real, P.<sup>3</sup>, Piloto, P.<sup>4</sup>

### RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo numérico do comportamento de vigas-coluna I metálicas com dilatação térmica restringida.

Foi usado um programa de elementos finitos com análise não linear geométrica e material especialmente desenvolvido para o estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo, para determinar a resistência de vigas-coluna a temperaturas elevadas, usando as propriedades mecânicas do aço de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 3.

Os resultados numéricos foram comparados com os resultados do método simplificado da versão de 1995 da parte 1-2 do Eurocódigo 3 e com a nova versão daquele eurocódigo.

### 1. INTRODUÇÃO

Para o dimensionamento de vigas-coluna tem que se ter em conta os fenómenos de encurvadura por varejamento e de encurvadura lateral. Apesar deste problema à temperatura ambiente ser actualmente bem conhecido, para temperaturas elevadas ainda não se encontra bem estudado.

As vigas fazem, de um modo geral, parte de estruturas que, pela sua rigidez, introduzem sempre alguma restrição aos deslocamentos axiais devidos à dilatação térmica quando sujeitas a um incêndio. A situação vulgarmente analisada de vigas isoladas, não corresponde à situação real de vigas integradas em pórticos, justificando-se assim o estudo que aqui se apresenta. Aquela restrição pode ser simulada através da consideração de uma

<sup>1</sup> Monitor, Universidade de Aveiro, Dep. Engenharia Civil, 3810 Aveiro.

<sup>2</sup> Prof. Associado c/ Agregação, Universidade de Coimbra, Dep. Engenharia Civil, 3030 Coimbra.

<sup>3</sup> Prof. Associado c/ Agregação, Universidade de Aveiro, Dep. Engenharia Civil, 3810 Aveiro.

<sup>4</sup> Prof. Coordenador, Instituto Politécnico de Bragança, Dep. Mecânica Aplicada, 5300 Bragança

força axial actuando simultaneamente com as cargas existentes. Assim estudou-se o comportamento de uma viga sujeita a flexão composta.

Optou-se por utilizar temperaturas uniformes em toda a secção, para mais facilmente se proceder à comparação dos resultados obtidos com o preconizado na nova versão do Eurocódigo 3 e pela versão de 1995 do mesmo Eurocódigo.

O programa utilizado foi o programa SAFIR que é um código de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, especialmente desenvolvido para a análise de estruturas sujeitas à acção do fogo.

Este programa é constituído por dois módulos de cálculo, um que analisa o comportamento térmico, e o outro que analisa o comportamento mecânico com os resultados da análise térmica previamente executada.

O elemento de viga utilizado baseia-se na hipótese de Bernoulli, em que as secções planas se mantêm planas depois da deformação e não é considerado o efeito do esforço transversal. No entanto este elemento não entra em conta com a encurvadura local pelo que só poderão ser considerados perfis das classes 1 e 2 definidos no Eurocódigo 3. Este elemento de viga é discretizado através de um modelo de fibras, o que permite a consideração de tensões residuais. O colapso da estrutura ocorre quando a sua matriz de rigidez deixar de ser definida positiva, não sendo mais possível estabelecer o equilíbrio na estrutura.

Apresentam-se neste trabalho os primeiros resultados obtidos no âmbito deste estudo.

## 2. CASO ESTUDADO

Analisou-se uma viga simplesmente apoiada com apoios de forquilha, carregada com esforço axial e momento flector segundo o eixo de maior inércia da peça, nas extremidades da viga (Fig. 1). O perfil utilizado foi o IPE220 em aço do tipo S235. Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos supondo uma temperatura constante de 400° em toda a secção transversal da viga.

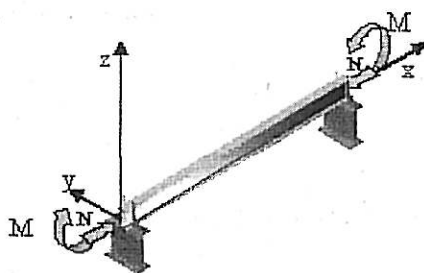


Fig. 1 – Viga simplesmente apoiada sujeita a esforços axiais e a momentos flectores.

Considerou-se que a viga tinha uma imperfeição inicial do tipo sinusoidal representada pela seguinte expressão.

$$y(x) = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (1)$$

Teve-se também em conta as tensões residuais representadas na figura 2, em que para o aço S235 os valores máximos seriam  $0.3 \times 235$  MPa.

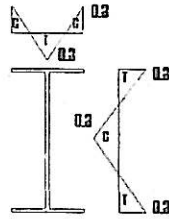


Fig. 2 – Tensões residuais: C – compressão; T – tracção

### 3. EFEITO DA RESTRIÇÃO À DILATAÇÃO TÉRMICA

Para determinar a rigidez da estrutura (K) pode-se usar um programa convencional de análise de estruturas, procedendo-se de acordo com o ilustrado na Fig. 3, ou seja, substituindo a viga em estudo por duas forças unitárias, e obtendo a variação relativa de comprimento (d) dos pontos de aplicação das forças. A rigidez a considerar numa mola que simule a rigidez da estrutura é igual ao inverso do deslocamento ( $K = 1/d$ ).

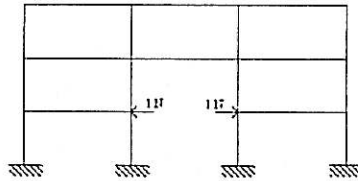


Fig. 3 – Cálculo da rigidez da estrutura K

A viga inserida no pórtico com fogo localizado nessa viga pode ser representada pelo seguinte modelo (Fig. 4).

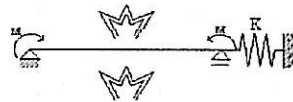


Fig. 4 – Viga com restrição à dilatação térmica

A restrição à dilatação térmica introduzida pela rigidez K (Fig.4) provoca um esforço axial na viga dado por:

$$N = -\frac{R}{\frac{K_v}{K_{v0}} + R} K_v L_v \alpha \Delta T \quad (2)$$

Em que:

$L_v$  - Comprimento da viga

$\Delta T = (\theta - 20)^\circ C$

$\alpha$  - Coeficiente de dilatação linear

$K_v$  - Rigidez axial da viga

$K_{v0}$  - Rigidez axial da viga à temperatura ambiente

$K$  - Rigidez da mola

$$R = \frac{K}{K_{v0}}$$

#### 4. ANÁLISE DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO 3 (1995)

De acordo com o Eurocódigo 3, parte 1-2 (1995) os elementos com secções das classes 1 e 2 (caso estudado) sujeitas a uma combinação de flexão e compressão, em situação de incêndio, devem satisfazer a condição:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{1.2 \frac{\chi_{min,fi}}{A k_{y,\theta}} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{K_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (3)$$

onde:

$$K_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\frac{\chi_{y,fi}}{1.2} A k_{y,\theta} f_y} \quad \text{mas } K_y \leq 1.5 \quad (4)$$

e

$$\mu_y = \bar{\lambda}_{y,\theta} (2\beta_{M,y} - 4) \left[ \frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right] \quad \text{mas } \mu \leq 0.9 \quad (5)$$

em que:

$\chi_{min,fi}$  é o menor dos factores de redução para o eixo yy e zz;

$W_{pl,y}$  é o módulo plástico da secção em relação ao eixo yy;

$k_{y,\theta}$  é o factor de redução da tensão de cedência à temperatura  $\theta$ ;

$\gamma_{M,fi}$  é o coeficiente de segurança parcial para a situação de incêndio (normalmente  $\gamma_{M,fi} = 1$ );

$\beta_{M,y}$  é o factor de momento uniforme equivalente correspondente à encurvadura por varejamento, no caso estudado ( $\beta_{M,y} = 1.1$ );

O factor de redução calcula-se de acordo com as expressões do Eurocódigo 3. O factor de redução em situação de incêndio,  $\chi_{y,fi}$  e  $\chi_{z,fi}$ , é determinado como se fosse à temperatura ambiente usando a esbelteza adimensional  $\bar{\lambda}_{y,\theta}$  e  $\bar{\lambda}_{z,\theta}$  dada pela equação (6). A constante 1.2 é um valor determinado empiricamente e é usado como um factor de correcção empírico. No cálculo do factor de redução para situação de incêndio a curva de encurvadura a ter em conta é a curva c ( $\alpha = 0.49$ ).

$$\bar{\lambda}_{y,\theta} = \bar{\lambda}_y \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad \bar{\lambda}_{z,\theta} = \bar{\lambda}_z \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (6)$$

onde:

$\bar{\lambda}_y$  e  $\bar{\lambda}_z$  são as esbeltezas adimensionais segundo o eixo yy e zz à temperatura ambiente;

$k_{E,\theta}$  é o factor de redução do módulo de elasticidade à temperatura  $\theta$ .

Foram tomados em consideração os seguintes valores:

$$N_{fi,\theta,Rd} = A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad M_{y,fi,\theta,Rd} = W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (7)$$

Para efeito de comparação de resultados optou-se por obter o valor de momento máximo actuante sobre momento plástico resistente à temperatura  $\theta$ . Tirando da eq.(3)  $M_{y,fi,Ed}$  e dividindo-o por  $M_{y,fi,\theta,Rd}$  da eq. (7).

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq \frac{1}{\left(1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\frac{\chi_{y,fi}}{1.2} N_{fi,\theta,Rd} \gamma_{M,fi}}\right)} \left(1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\frac{\chi_{min,fi}}{1.2} N_{fi,\theta,Rd}}\right) \quad (8)$$

Como o estudo trata vigas-coluna, tem que se considerar a encurvadura lateral, pelo que para além da verificação anterior se fez também:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\frac{\chi_{z,fi}}{1.2} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{K_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\frac{\chi_{LT}}{1.2} W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (9)$$

$$K_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\frac{\chi_{z,fi}}{1.2} A k_{y,\theta} f_y} \quad \text{mas} \quad K_{LT} \leq 1.0 \quad (10)$$

$$\mu_{LT} = 0.15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0.15 \quad \text{mas} \quad \mu \leq 0.9 \quad (11)$$

$\beta_{M,LT}$  é o factor de momento uniforme equivalente, correspondente à encurvadura lateral, no caso estudado ( $\beta_{M,LT} = \beta_{M,y} = 1.1$ );

O factor de redução para encurvadura lateral calcula-se de acordo com as expressões do Eurocódigo 3 caso a esbelteza adimensional  $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$  para a temperatura  $\theta$ , exceda o valor de 0.4. O factor de redução em situação de incêndio,  $\chi_{LT,fi}$ , é determinado como se fosse à temperatura ambiente usando a esbelteza adimensional  $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$  dada por.

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (12)$$

Para efeito de comparação de resultados optou-se por obter o valor de momento máximo actuante sobre momento plástico resistente à temperatura  $\theta$ . Tirando da eq.(9)  $M_{y,fi,Ed}$  e dividindo-o por  $M_{y,fi,\theta,Rd}$  da eq. (7).

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq \frac{\chi_{LT}}{1.2 \left(1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\frac{\chi_{z,fi}}{1.2} N_{fi,\theta,Rd} \gamma_{M,fi}}\right)} \left(1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\frac{\chi_{z,fi}}{1.2} N_{fi,\theta,Rd}}\right) \quad (13)$$

### 5. ANÁLISE DE ACORDO COM A NOVA VERSÃO DO EUROCÓDIGO 3

De acordo com a nova versão do Eurocódigo 3 (2002) os elementos com secções das classes 1 e 2 (caso estudado) sujeitas a uma combinação de flexão e compressão, em situação de incêndio, devem satisfazer a condição:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{K_y M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (14)$$

$$K_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \quad \text{mas } K_y \leq 3 \quad (15)$$

e

$$\mu_y = (1.2\beta_{M,y} - 3)\bar{\lambda}_{y,\theta} + 0.44\beta_{M,y} - 0.29 \quad \text{mas } \mu \leq 0.8 \quad (16)$$

com:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_\theta + \sqrt{[\phi_\theta]^2 - [\bar{\lambda}_\theta]^2}} \quad (17)$$

em que:

$$\phi_\theta = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + (\bar{\lambda}_\theta)^2 \right] \quad (18)$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235/f_y} \quad (19)$$

 $\chi_{fi}$  é o factor de redução segundo o eixo yy e zz em situação de incêndio;

$$\bar{\lambda}_{y,\theta} = \bar{\lambda}_y \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad \bar{\lambda}_{z,\theta} = \bar{\lambda}_z \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (20)$$

 $\bar{\lambda}_y$  e  $\bar{\lambda}_z$  são as esbeltezas adimensionais segundo o eixo yy e zz à temperatura ambiente; $k_{E,\theta}$  é o factor de redução do módulo de elasticidade à temperatura  $\theta$ .

Para efeito de comparação de resultados optou-se por obter o valor de momento máximo actuante sobre momento plástico resistente à temperatura  $\theta$ . Tirando da eq.(14)  $M_{y,fi,Ed}$  e dividindo-o por  $M_{y,fi,\theta,Rd}$  da eq. (7).

$$\frac{M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq \frac{1}{\left( 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} N_{fi,\theta,Rd}} \right)} \left( 1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} N_{fi,\theta,Rd}} \right) \quad (21)$$

Como o estudo trata vigas-coluna, tem que se considerar a encurvadura lateral, pelo que para além da verificação anterior se fez também:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{K_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (22)$$

onde:

$$K_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \quad \text{mas } K_{LT} \leq 1.0 \quad (23)$$

e

$$\mu_{LT} = 0.15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,Lt} - 0.15 \quad \text{mas } \mu \leq 0.9 \quad (24)$$

$\beta_{M,LT}$  o factor de momento uniforme equivalente correspondente à encurvadura lateral, no caso estudado ( $\beta_{M,LT} = \beta_{M,y} = 1.1$ );

com:

$$\chi_{LT,\beta} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta}]^2}} \quad (25)$$

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (26)$$

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235/f_y} \quad (27)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (28)$$

Para efeito de comparação de resultados optou-se por obter o valor de momento máximo actuante sobre momento plástico resistente à temperatura  $\theta$ . Tirando da eq.(22)  $M_{y,\beta,Ed}$  e dividindo-o por  $M_{y,\beta,\theta,Rd}$  da eq. (7).

$$\frac{M_{y,\beta,Ed}}{M_{\beta,\theta,Rd}} \leq \frac{\chi_{LT}}{\left( 1 - \frac{\mu_{LT} N_{\beta,Ed}}{\chi_{z,\beta} N_{\beta,\theta,Rd}} \right)} \left( 1 - \frac{N_{\beta,Ed}}{\chi_{z,\beta} N_{\beta,\theta,Rd}} \right) \quad (29)$$

## 6. COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS VERSÕES DO EUROCÓDIGO 3 E O PROGRAMA SAFIR

### 6.1 Resultados para vigas e para colunas

A comparação dos dois métodos de cálculo apresentados anteriormente, para vigas simplesmente apoiadas sujeitas a flexão simples e para pilares sujeitos apenas a esforços axiais, é feita nas figuras 5 e 6 respectivamente, onde se apresentam também os resultados numéricos obtidos com o programa SAFIR.

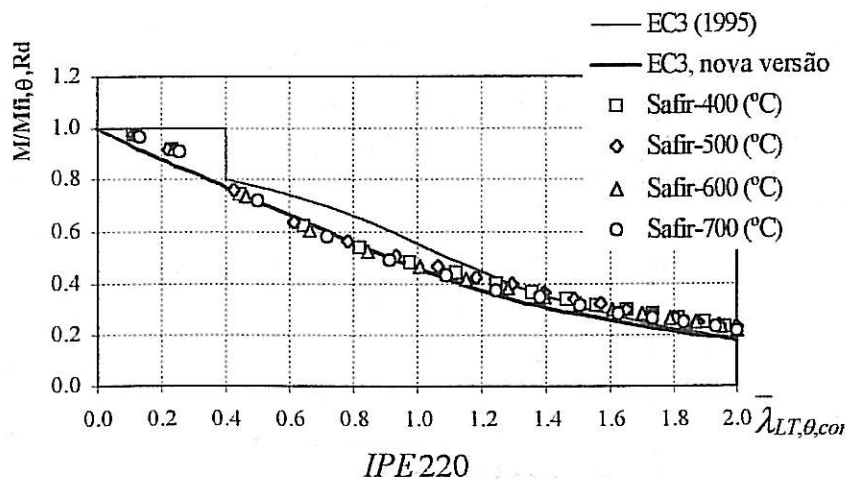


Fig. 5 – Comparação entre as curvas de encurvadura lateral do Eurocódigo 3 (1995), a nova versão do Eurocódigo 3 e os resultados numéricos.

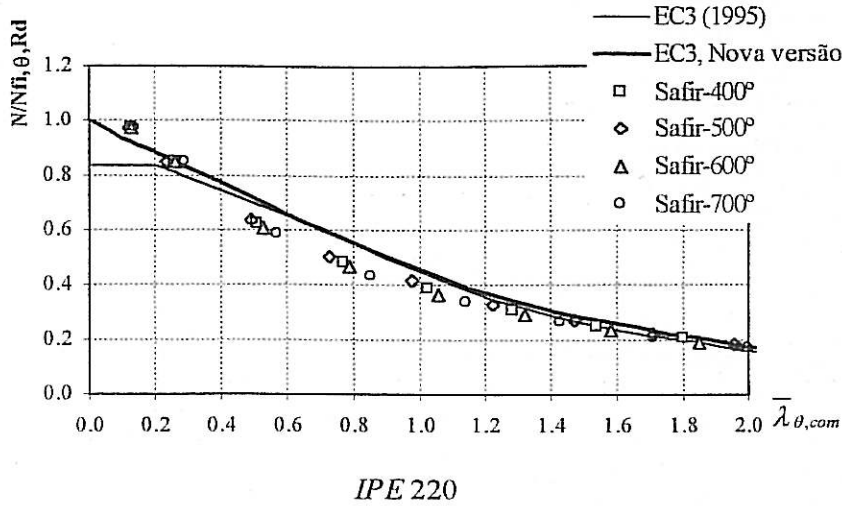


Fig. 6 – Comparação entre as curvas de encurvadura por compressão do Eurocódigo 3 (1995), a nova versão do Eurocódigo 3 e os resultados numéricos.

6.2 Resultados para vigas-coluna

Os momentos flectores obtidos com o programa de elementos finitos SAFIR correspondentes ao colapso a 400° da viga representada na fig. 1 foram divididos por  $M_{y,fi,\theta,Rd}$ , com a intenção de os poder comparar aos obtidos pelo Eurocódigo 3 (1995) e aos obtidos pela nova versão do Eurocódigo 3. Os gráficos da figura (7) à figura (15) apresentam  $M/M_{y,fi,\theta,Rd}$  em função de  $N/N_{fi,\theta,Rd}$ , em que N é o esforço axial actuante correspondente à restrição à dilatação térmica e M o momento resistente da viga para os três casos em estudo.

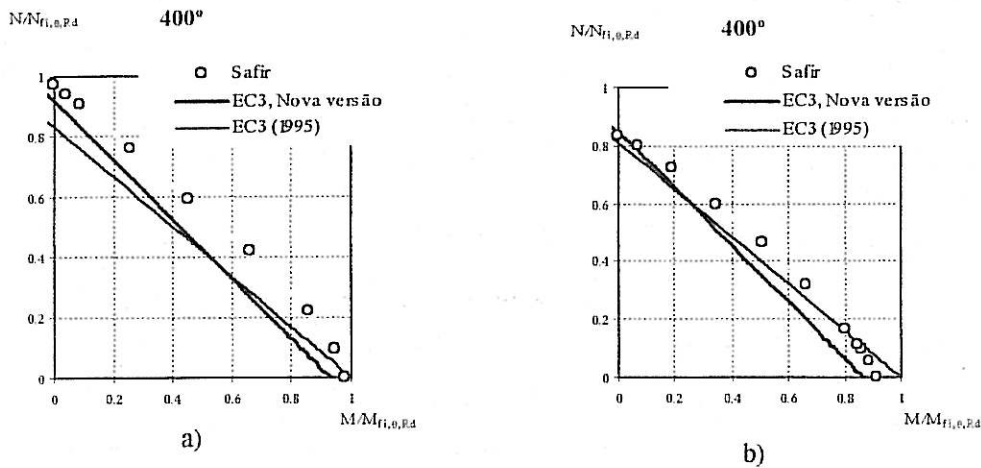


Fig.7-a) L=250mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0.12$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.03$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 0.13$ ; b) L=500mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0.23$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.07$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 0.26$

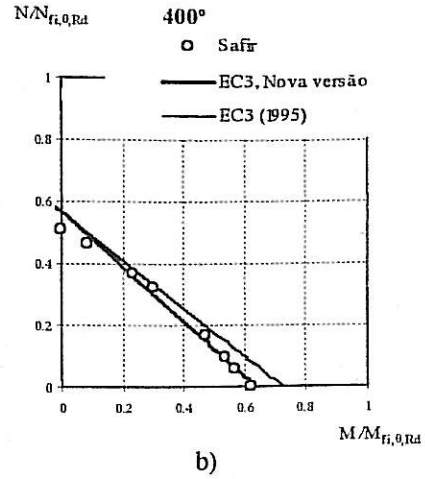
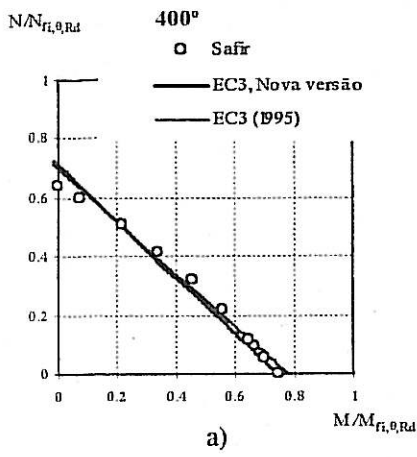


Fig.8-a)L=1000mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0.45$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.14$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 0.51$ ; b)L=1500mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0.64$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.21$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 0.77$

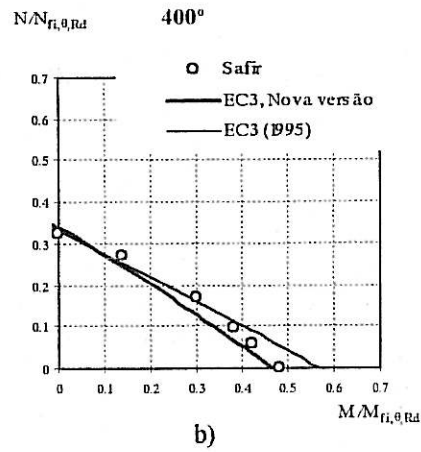
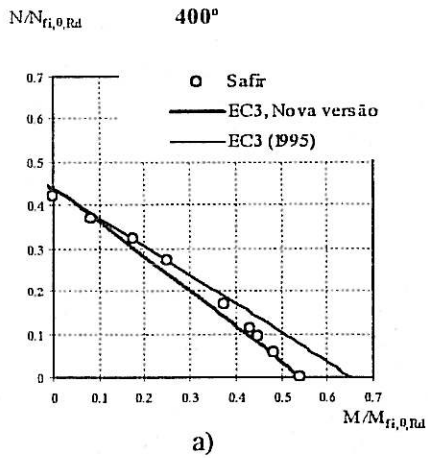


Fig.9-a)L=2000mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0.82$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.28$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 1.03$ ; b)L=2500mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0.98$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.35$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 1.28$

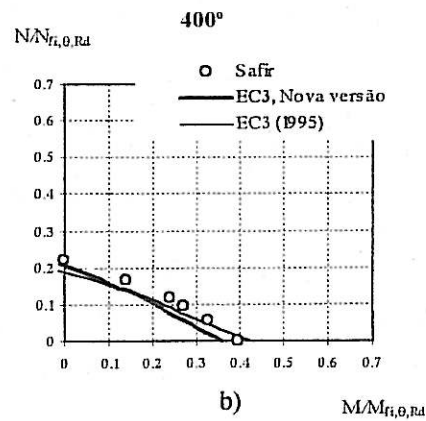
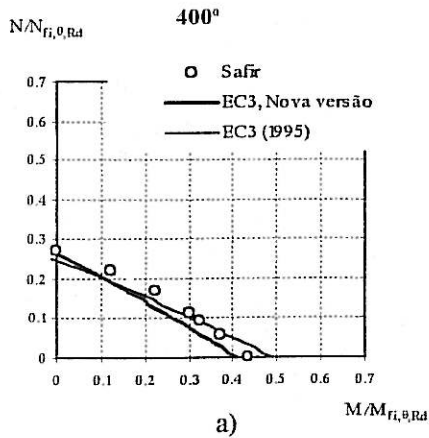


Fig.10-a)L=3000mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.12$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.42$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 1.54$ ; b)L=3500mm;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.24$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.49$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 1.80$

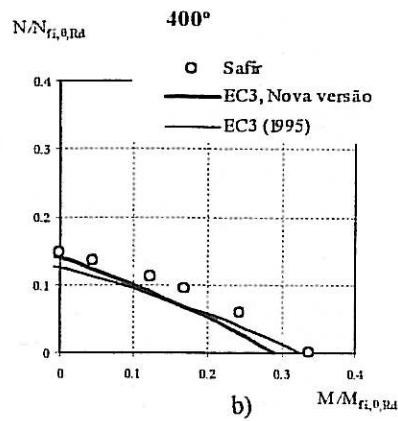
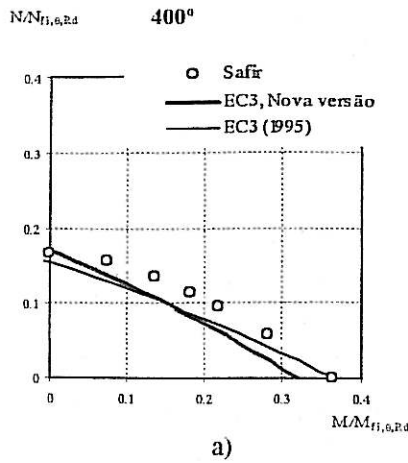


Fig. 11-a)  $L=4000\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.35$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.56$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 2.05$ ; b)  $L=4500\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.46$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.63$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 2.31$

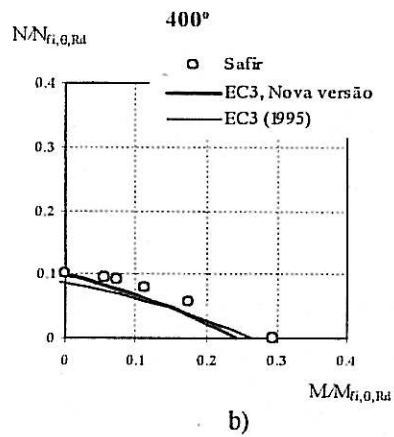
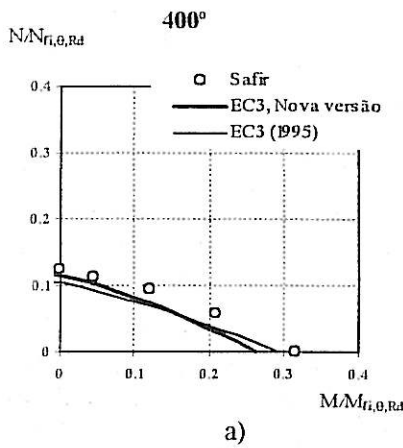


Fig. 12-a)  $L=5000\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.56$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.70$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 2.57$ ; b)  $L=5500\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.65$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.77$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 2.82$

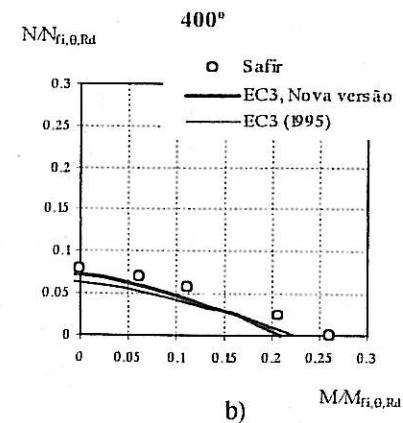
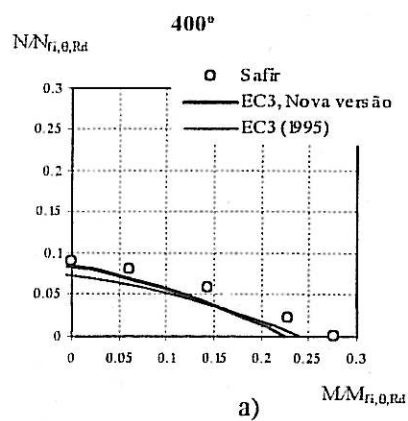


Fig. 13-a)  $L=6000\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.73$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.84$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 3.08$ ; b)  $L=6500\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 1.81$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi} = 0.91$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi} = 3.34$

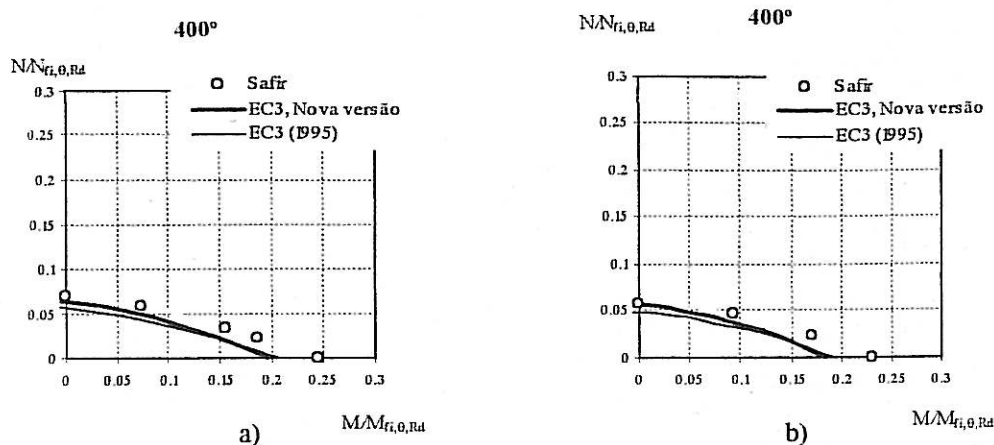


Fig.14-a)  $L=7000\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi}=1.89$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.98$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi}=3.59$ ; b)  $L=7500\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi}=1.96$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi}=1.05$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi}=3.85$

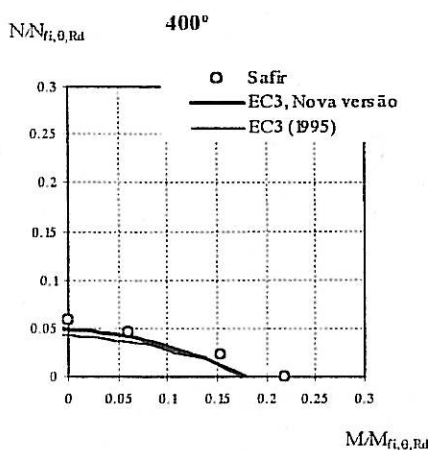


Fig.15- $L=8000\text{mm}$ ;  $\bar{\lambda}_{LT,fi}=2.04$ ;  $\bar{\lambda}_{y,fi}=1.12$ ;  $\bar{\lambda}_{z,fi}=4.11$

## 8. CONCLUSÕES

Para comprimentos de vigas-coluna maiores que 500mm e menores que 3000mm a nova versão do Eurocódigo 3 está do lado da segurança relativamente aos resultados numéricos obtidos com o programa SAFIR, ao contrário do que acontece com a versão de 1995 do Eurocódigo 3, justificando-se pois as alterações da nova versão do Eurocódigo em relação ao anterior, no dimensionamento de vigas à encurvadura lateral.

Para situações em que o esforço axial esgota quase toda a capacidade resistente da viga-coluna (situação próxima de pilares sujeitos apenas a esforço axial), os resultados numéricos obtidos pelo SAFIR mostram que as duas versões do Eurocódigo 3 aqui analisadas não estão do lado da segurança. Este facto foi alvo de estudos experimentais por Frassen et al. (1998) em que a curva de dimensionamento foi deduzida à custa dos valores experimentais e não dos resultados numéricos, razão pela qual relativamente a estes a nova proposta não se encontra pelo lado da segurança como se pôde constatar na Fig. 6.

## 9. REFERÊNCIAS

- CEN ENV 1993-1-2, Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-2: General Rules – Structural fire design, 1995.
- Vila Real, P.M.M. e Franssen, J.-M., Lateral buckling of steel I beams under fire conditions - Comparison between the EUROCODE 3 and the SAFIR code, relatório interno No. 99/02, Instituto de Engenharia Civil – Service Ponts et Charpents – da Universidade de Liege, 1999.
- Vila Real, P.M.M. e Franssen, J.-M., Numerical Modelling of Lateral Buckling of Steel I Beams Under Fire Conditions – Comparison with Eurocode 3, Vol. 11, No. 2, *Journal of Fire Protection Engineering*, USA, pp. 112-128, 2001.
- Vila Real, P.M.M., Piloto, P.A.G. e Franssen, J.-M., A New Proposal of a Simple Model for the Lateral-Torsional Buckling of Unrestrained Steel I-Beams in Case of Fire: Experimental and Numerical Validation, *Journal of Constructional Steel Research*, ELSEVIER, Vol. 59/2, pp. 179-199, 2003.
- Nwosu, D.I., Kodur, V.K.R., Franssen, J.-M., e Hum, J.K., User Manual for SAFIR. A Computer Program for Analysis of Structures at Elevated Temperature Conditions, National Research Council Canada, int. Report 782, pp. 69, 1999.
- EUROCODE 3, Design of Steel Structures – Part 1-1. General rules and rules for buildings. Draft ENV 1993-1-1, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, 1992.
- Franssen, J.-M., Schleich, J.-B., Cajot, L.-G., e Azpiazu, W., A Simple Model for the Fire Resistance of Axially-loaded Members-Comparison with Experimental Results *Journal Construct. Steel Research*, Vol. 37, pp. 175-204, 1996.
- ECCS – EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK, Technical Committee 8 – Structural Stability, Technical Working Group 8.2 – System, “Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames With Rigid Joints”, first edition, 1984.
- Franssen, J.-M., Schleich, J.-B. e Cajot L.-G., A Simple Model for Fire Resistance of Axially-loaded Members According to Eurocode 3, *Journal Construct. Steel Research*, Vol. 35, pp. 49-69, 1995.
- Franssen, J. M., Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire, *Fire Safety Journal*, Vol. 34, pp. 191-207, 2000.
- Franssen, J. M., Taladona, D., Kruppa, J., e Cajot, L.G., Stability of Steel Columns in Case of Fire: Experimental Evaluation, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 2, Feb. 1998.
- EUROCODE 3, Design of Steel Structures – Part 1-2. General rules Structural Fire Design. Draft prEN 1993-1-2, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, February 2002.