

ESTRUTURAS

2002

**Congresso Nacional da
ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**OS NOVOS DESAFIOS NA
QUALIDADE DAS OBRAS**

Editor

Comissão Organizadora

S. Pompeu Santos
António M. Baptista
Paulo Silveira

**Congresso Nacional da
ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

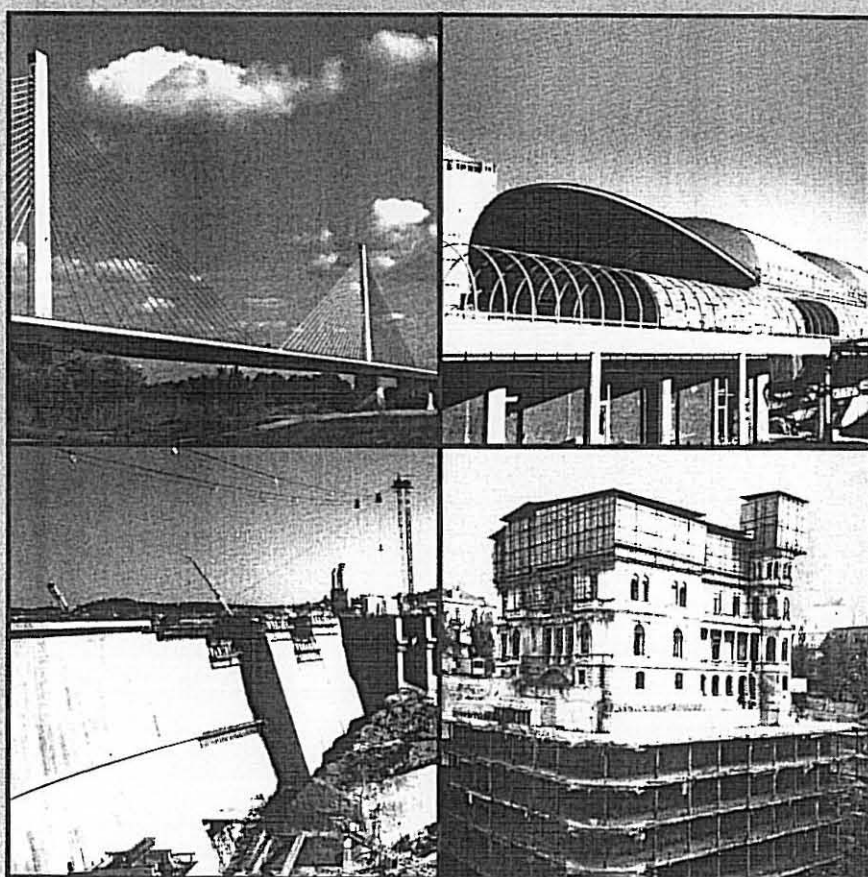
ESTRUTURAS

2002

**OS NOVOS
DESAFIOS NA
QUALIDADE DAS OBRAS**

*Integrado nas Comemorações dos
150 Anos do Ministério das Obras
Públicas, Transportes e Habitação*

Lisboa, LNEC, 10 a 13 de Julho de 2002



Organizado por:

APEE – Associação Portuguesa de Engenharia de Estruturas

Colaboração de:

APAET – Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões

CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

SPES – Sociedade Portuguesa de Engenharia Sísmica

SPPC – Sociedade para a Preservação do Património Construído

Apoio de:

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Ordem dos Engenheiros

Ordem dos Arquitectos

DA INVESTIGAÇÃO À APRESENTAÇÃO AO EC3 DE UMA NOVA PROPOSTA DE CÁLCULO SIMPLES DA RESISTÊNCIA À ENCURVADURA LATERAL DE VIGAS METÁLICAS SUJEITAS À ACÇÃO DO FOGO



P. M. M. VILA REAL
Prof. Associado
Universidade de Aveiro
Aveiro



P. A. G. PILOTO
Prof. Coordenador
IPB
Bragança

SUMÁRIO

Este trabalho descreve uma nova proposta de cálculo simples da resistência à encurvadura lateral de vigas metálicas em situação de incêndio bem como os resultados obtidos no âmbito de um projecto de investigação destinado a validá-la. Foram efectuados 120 ensaios experimentais e modelações numéricas baseadas nas características mecânicas e geométricas de vigas IPE 100 submetidas a temperaturas que variaram entre os 20 °C e os 600 °C. Demonstrar-se-á que esta nova proposta é mais segura que a preconizada na parte 1.2 do Eurocódigo 3 (1995).

1. INTRODUÇÃO

O comportamento de vigas metálicas I sujeitas a elevadas temperaturas foi analisado numericamente por Vila Real et al. [1,2] tendo sido apresentada uma nova proposta de cálculo simples da resistência à encurvadura lateral de vigas em situação de incêndio. Esta nova proposta contém um escalar β , que teve de ser calibrado de modo a assegurar um nível de segurança apropriado, através de um conjunto alargado de testes experimentais e simulações numéricas [3,4].

Apesar do problema da encurvadura lateral de vigas de aço ser bem conhecido à temperatura ambiente [5-7], o mesmo problema a temperaturas elevadas não está tão bem estudado. Neste âmbito existe um artigo de Bailey et al. [8] que usa um modelo computacional tridimensional para investigar o comportamento de vigas cujo colapso pode ocorrer por encurvadura lateral

sujeitas a aquecimento uniforme. A proposta que o presente artigo apresenta foi baseada em resultados numéricos obtidos com o programa SAFIR, um código de elementos finitos para análise não linear geométrica e material, especialmente desenvolvido para estudar estruturas sujeitas à acção do fogo [9]. A capacidade deste programa modelar a encurvadura lateral de vigas foi demonstrada por Vila Real et al. [10] à temperatura ambiente através de comparações com as fórmulas do Eurocódigo 3, Part 1-1 [11] e por Franssen et al. [12] quando comparou o programa SAFIR com outros quatro programas de análise estrutural.

Deve fazer-se notar que a nova proposta apresentada inicialmente por Vila Real et al. [2] e mais tarde validada através de um vasto conjunto de ensaios experimentais e simulações numéricas [3,4], foi estabelecida com base em simulações numéricas sobre vigas IPE 220, usando valores característicos para a deformada longitudinal das vigas ($L/1000$) e para as tensões residuais ($0.3 \times 235 \text{ MPa}$), o que não é muito provável que aconteça simultaneamente num incêndio real. Assim, para evitar este inconveniente e para validar aquela proposta, foram medidas experimentalmente as imperfeições geométricas, as tensões residuais, o módulo de Young e a tensão de cedência do material, sendo estes valores usados posteriormente nas simulações numéricas. Foram feitos também um conjunto de 120 testes à escala real sobre vigas da série europeia IPE 100 cujos comprimentos variaram entre os 0.5 metros e os 6.5 metros. Por razões de tratamento estatístico para cada comprimento e para cada nível de temperatura foram feitos três ensaios. As vigas foram aquecidas através de resistências electro-cerâmicas tendo sido utilizada uma unidade de potência de 70 kVA. Com o objectivo de melhorar a eficiência térmica foram ainda utilizadas mantas de fibras envolvendo as vigas.

2. OS PRIMEIROS RESULTADOS NUMÉRICOS E A NOVA PROPOSTA

Estudou-se uma viga simplesmente apoiada sujeita a uma distribuição de momentos uniforme (Fig. 1).

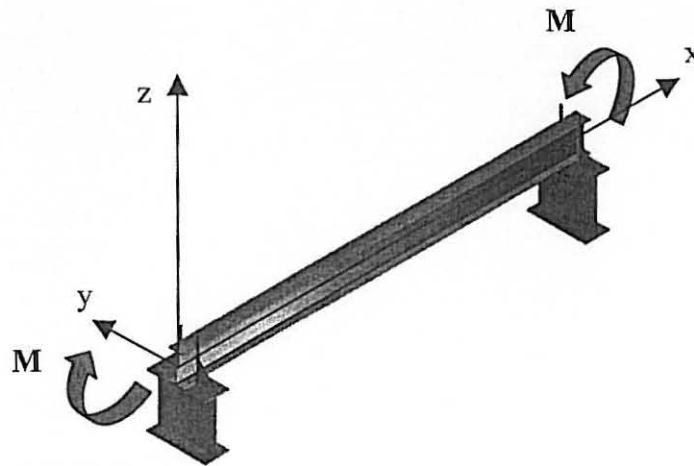


Fig. 1 : Viga tridimensional simplesmente apoiada, sujeita a momentos nas extremidades.

i baseada em
s finitos para
dar estruturas
ura lateral de
comparações
o comparou o

il et al. [2] e
e simulações
gas IPE 220,
10) para as
ultaneamente
oposta, foram
o módulo de
iormente nas
ila real sobre
tros e os 6.5
ada nível de
ncias electro-
objectivo de
as vigas.

itos uniforme

emidades.

Trata-se de um perfil IPE 220 com apoios de forquilha que impedem os deslocamentos laterais e a rotação segundo o eixo longitudinal do perfil nas secções das extremidades. Admitiu-se que a viga estava sujeita, nos quatro lados, à curva de incêndio padrão ISO 834 [13], sendo os resultados numéricos comparados com os resultados obtidos através das fórmulas do Eurocódigo 3, Parte 1-2 [14], para tempos de exposição ao fogo de 10, 15, 20 e 30 minutos.

Considerou-se que a viga tinha uma imperfeição geométrica inicial do tipo sinusoidal [2] e as tensões residuais foram tidas em consideração de acordo com a publicação do ECCS [15].

2.1 Análise de acordo com o Eurocódigo 3

A temperatura da viga ao longo do tempo foi obtida através da equação de condução de calor simplificada do Eurocódigo 3, Parte 1-2 [14]. Conhecida a temperatura, a qual de acordo com as simplificações do Eurocódigo é uniforme na secção recta da viga, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio no instante t , $M_{b,fi,t,Rd}$, tendo em atenção que a esbelteza adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$, para a temperatura máxima no banzo comprimido, $\theta_{a,com}$, atingida no instante t , calcula-se de acordo com:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

onde:

$\chi_{LT,fi}$ é o factor de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio, dado por

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

e

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} - 0.2) + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (3)$$

$W_{pl,y}$ é o módulo plástico da secção;

$k_{y,\theta,com}$ é o factor de redução relativo à tensão de cedência para a máxima temperatura no banzo comprimido, $\theta_{a,com}$, atingida no instante t ;

$\gamma_{M,fi}$ é o factor parcial de segurança em situação de incêndio (geralmente $\gamma_{M,fi}$).

A equação (1) é apenas válida para $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} \geq 0.4$. Se a esbelteza adimensional é inferior a este valor limite de 0.4 é considerado que não há ocorrência de encurvadura lateral, podendo ser atingido o momento plástico da secção.

A constante 1.2 na eq. (1) é um valor empírico utilizado como factor de correcção. O factor de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio, $\chi_{LT,fi}$, deve ser calculado como

no caso de temperatura ambiente, com a diferença de que a esbelteza adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ para a temperatura $\theta_{a,com}$ é dada por

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}} \quad (4)$$

onde

$\bar{\lambda}_{LT}$ é a esbelteza adimensional à temperatura ambiente dada por (para secções de classe 1 ou de classe 2)

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \quad (5)$$

onde

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (6)$$

$$\lambda_{LT} = \pi \sqrt{\frac{E w_{pl,y}}{M_{cr}}} \quad (7)$$

onde M_{cr} é o momento crítico elástico para a encurvadura lateral.

$k_{E,\theta,com}$ é o factor de redução do módulo de Young à temperatura máxima no banzo comprimido, $\theta_{a,com}$, atingida no instante t .

A linha contínua da Figura 2 mostra a curva de encurvadura lateral dada pelo Eurocódigo3. Esta curva é única para temperaturas superiores a 20 °C e é designada na figura por EC3,fi. No eixo das ordenadas está representada a relação

$$\frac{M_{b,fi,t,Rd}}{M_{fi,\theta,Rd}} \quad (8)$$

onde, $M_{b,fi,t,Rd}$ é o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio no instante t dado pela equação (1) e o valor de cálculo do momento resistente da viga $M_{fi,\theta,Rd}$ para secções da Classe 1 e 2 com temperaturas uniformes de θ_a é dado por:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} M_{Rd} \quad (9)$$

onde, $\gamma_{M,0} = 1.0$, $\gamma_{M,fi} = 1.0$ e M_{Rd} é o momento plástico $M_{pl,Rd}$ à temperatura ambiente, dado por

$$M_{Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M,0}} \quad (10)$$

onde $\gamma_{M,0} = 1.0$.

sional $\bar{\chi}_{LT,\theta,com}$

(4)

para secções de

(5)

(6)

(7)

eral.

xima no banzo

o Eurocódigo3.
por EC3,fi. No

(8)

ral em situação
to resistente da
é dado por:

(9)

atura ambiente,

(10)

$$M_{b,fi,Rd} / M_{fi,Rd}$$

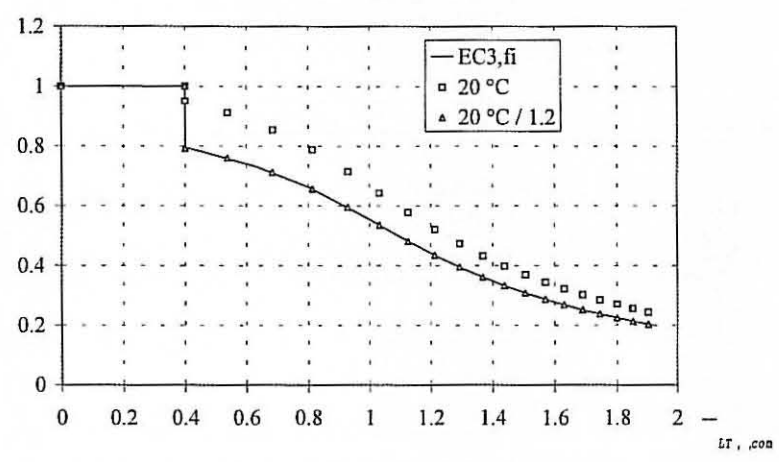


Fig. 2 : Curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3, em situação de incêndio (EC3,fi) e à temperatura ambiente (20°C).

Nesta figura pode verificar-se que a curva de encurvadura lateral a 20 °C difere da mesma curva a temperaturas elevadas, para valores da esbelteza adimensional superiores a 0.4, devido ao factor empírico de 1.2. Esta figura mostra também que a curva a elevadas temperaturas, EC3,fi, se obtém da curva a 20 °C dividindo as suas ordenadas por 1.2. Assim, deve ser realçado que nas curvas de encurvadura lateral utilizadas ao longo deste trabalho, o cociente $M_{b,fi,Rd} / M_{fi,Rd}$ marcado no eixo das ordenadas, representa o factor de redução relativo à encurvadura lateral em situação de incêndio, $\chi_{LT,fi}$ dividido por 1.2, isto é:

$$\frac{M_{b,fi,Rd}}{M_{fi,Rd}} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2\gamma_{M,0}}, \text{ para os resultados do Eurocódigo 3, Parte 1-2} \quad (11)$$

ou

$$\frac{M_{SAFIR}}{M_{fi,Rd}}, \text{ para os resultados do programa SAFIR} \quad (12)$$

2.2 Análise com o programa SAFIR

O cálculo da evolução no tempo dos campos de temperatura na secção recta do perfil metálico analisado é feito através do Método dos Elementos Finitos, pelo que, estas distribuições não serão uniformes, como as que se obtém quando se utiliza a equação de condução de calor simplificada do Eurocódigo 3.

O incremento de carga utilizado foi de 100 [Nm] para as temperaturas correspondentes aos instantes 10, 15 e 20 minutos e de 50 [Nm] para as temperaturas obtidas ao fim de 30 minutos.

A simulação numérica foi realizada tendo em consideração que:

- Condições nos apoios: a viga é simplesmente apoiada e nas extremidades os deslocamentos laterais e a rotação em torno do eixo longitudinal são impedidos;
- Imperfeição lateral inicial: Sinusoidal, com um valor máximo a meio vão de $L/1000$;
- Tensões residuais: constantes ao longo da espessura da alma e dos banzos e com uma distribuição triangular como se mostra na figura 3, com um valor máximo de 0.3×235 [Mpa] [15] para ambas as qualidades de aço consideradas, Fe 360 / S235 e Fe 510 / S355.

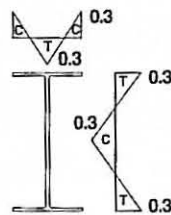
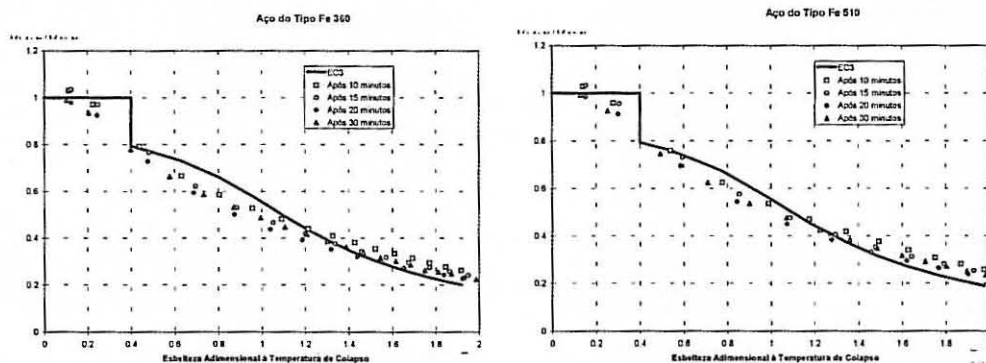


Fig. 3 – Tensões residuais. C – compressão; T – tracção.

A Figura 4 compara a curva de encurvadura lateral correspondente ao Eurocódigo 3 com os valores obtidos com o programa SAFIR para todos os instantes de tempo analisados (10, 15, 20 e 30 minutos).



a) Aço do tipo Fe 360.

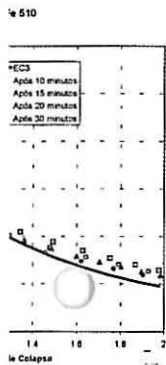
b) Aço do tipo Fe 510.

Fig. 4 : Curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3 e resultados do SAFIR.

Nesta figura, $M_{b,fi,t,Rd}$ é o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante t dado pela equação (1) ou calculado com o programa SAFIR e o valor de cálculo do momento resistente $M_{fi,\theta,Rd}$ dado pela equação (4) é avaliado para as temperaturas obtidas com a equação simplificada do Eurocódigo 3, isto é, 554 °C, 680 °C, 733 °C e 827 °C para os instantes de tempo 10, 15, 20 e 30 minutos respectivamente. A esbelteza adimensional foi calculada para essas temperaturas de acordo com a equação (2).

extremidades os
o impedidos;
io vão de $L/1000$;
los banzos e com
valor máximo de
s, Fe 360 / S235 e

código 3 com os
isados (10, 15, 20



10.

SAFIR.

vadura lateral no
lor de cálculo do
peraturas obtidas
e 827 °C para os
adimensional foi

2.3 Nova Proposta

Adoptando para a encurvadura lateral de vigas a mesma proposta de Franssen et al. [16] para a encurvadura de colunas em situação de incêndio carregadas axialmente, o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio passa a ser dado, segundo a nova proposta, por:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\beta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (13)$$

onde

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\beta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\beta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\beta,com}]^2}} \quad (14)$$

$$\phi_{LT,\beta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\beta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\beta,com})^2 \right] \quad (15)$$

e

$$\bar{\lambda}_{LT,\beta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\beta,com}}{k_{E,\beta,com}}} \quad (16)$$

onde

$\bar{\lambda}_{LT}$ é a esbelteza adimensional à temperatura ambiente;

$\alpha = \beta \epsilon$ é o factor de imperfeição;

β é o factor de severidade, a ser escolhido de modo a assegurar um nível de segurança apropriado;

$\epsilon = \sqrt{235 / f_y}$, em que f_y é a tensão de cedência em [MPa].

Comparando as equações (1) e (13) pode verificar-se que nesta nova proposta não se utiliza a constante empírica de 1.2 que é usada como factor de correcção no Eurocódigo 3.

As equações (14) e (15) são exactamente as mesmas que as equações (2) e (3) do Eurocódigo 3, Parte 1-2, excepto que o limite de 0.2 para $\bar{\lambda}_{LT}$ não aparece na equação (15). Este facto altera a forma da curva de encurvadura lateral. Esta nova curva começa com um valor de $\chi_{LT} = 1.0$ para $\bar{\lambda}_{LT} = 0$ o qual vai diminuindo mesmo para pequenos valores da esbelteza adimensional, em vez de ter um patamar até um valor de $\bar{\lambda}_{LT} = 0.4$ (ver Fig. 5).

A curva de encurvadura lateral varia agora com a tensão de cedência devido ao parâmetro ϵ que figura no factor de imperfeição.

Quando confrontou este modelo simplificado de cálculo com resultados experimentais da resistência ao fogo de colunas carregadas axialmente, Franssen et al. [16] chegou a um valor do factor de severidade de 0.65, valor este que veio a ser adoptado nos documentos de aplicação nacionais, Francês e Belga, relativos ao Eurocódigo 3, Parte 1-2.

A Figura 5 mostra a influência do valor do factor de severidade na forma da curva de encurvadura lateral para o aço Fe 360, estando representadas as curvas correspondentes a valores desse factor iguais a 1.2, 0.9 e 0.65. Como o valor de 0.65 dá resultados seguros quando comparados com os resultados numéricos do programa SAFIR, foi este o valor adoptado nesta nova proposta, estando as novas curvas de encurvadura representadas na Figura 6 para os aços do tipo Fe 360 e Fe 510.

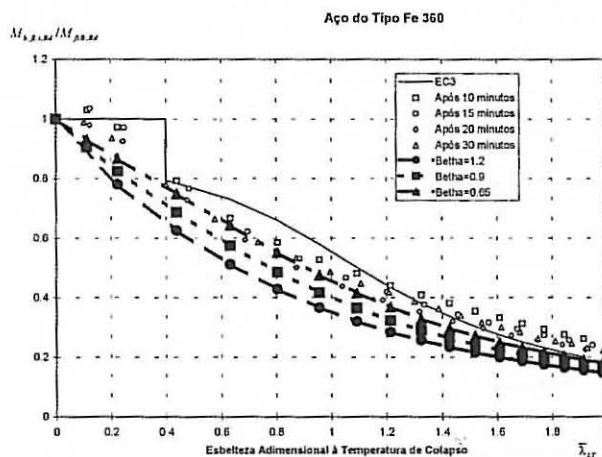
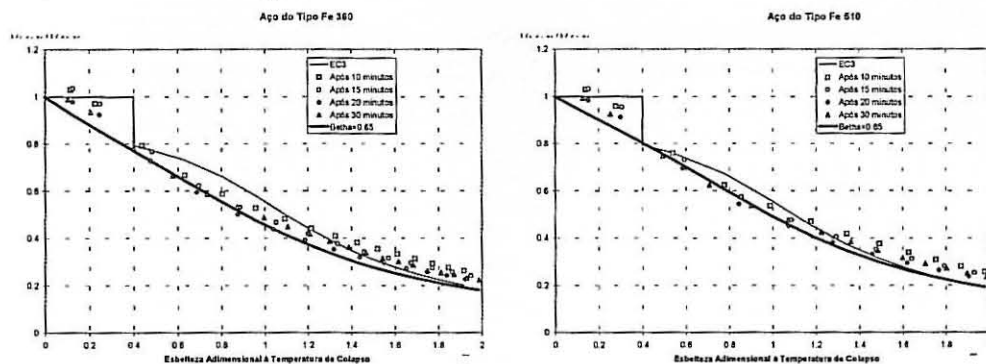


Fig. 5 : Curvas de encurvadura lateral obtidas com o Eurocódigo 3, o programa SAFIR (após 10, 15, 20 e 30 minutos) e com a nova proposta.

O facto de se adoptar para o caso da encurvadura lateral de vigas, o mesmo valor do coeficiente de severidade adoptado por Jean-Marc Franssen et al. [16] para o caso da encurvadura de colunas, conduz à mesma filosofia que o Eurocódigo 3 actualmente adopta, isto é, usar as mesmas fórmulas para o factor de redução χ , quer se trate de encurvadura de colunas ou de encurvadura lateral de vigas.



a) Aço do tipo Fe 360.

b) Aço do tipo Fe 510.

Fig. 6 : Curvas de encurvadura lateral obtidas com o Eurocódigo 3, o programa SAFIR (após 10, 15, 20 e 30 minutos) e com a nova proposta com $\beta = 0.65$.

ia da curva de
respondentes a
altados seguros
di este o valor
tadas na Figura

Na figura 7 é bem visível que com esta nova proposta as curvas de encurvadura lateral são agora dependentes da qualidade do aço contrariamente ao que acontece com a versão actual do Eurocódigo 3.

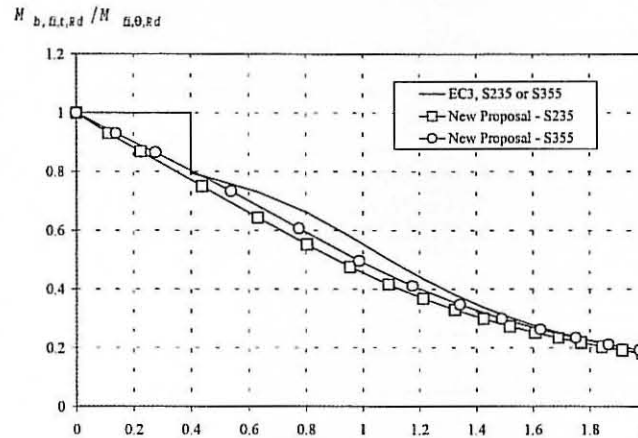


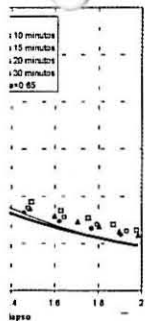
Fig. 7 : Comparação entre a curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3 a nova proposta.

ma SAFIR

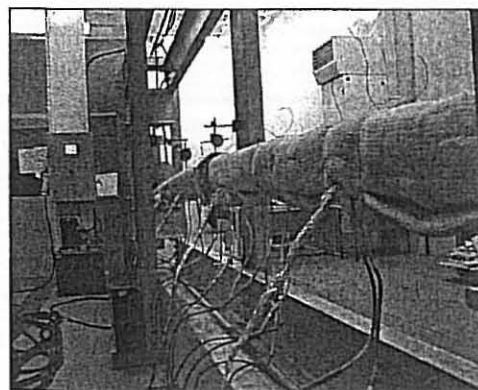
3. VALIDAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA NOVA PROPOSTA

r do coeficiente
encurvadura de
isto é, usar as
: colunas ou de

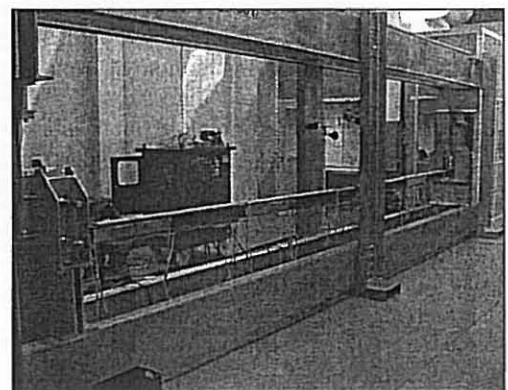
Com o objectivo de validar esta proposta fizeram-se simulações numéricas tendo, para o efeito, medido experimentalmente as propriedades mecânicas do aço, as imperfeições geométricas de vigas IPE 100 bem como as suas tensões residuais. Realizaram-se 120 ensaios experimentais à escala real [3,4] tendo-se utilizado resistências eléctricas para aquecer as vigas como se mostra na figura 8. Estes estudos vieram a confirmar a escolha do valor 0.65 para o factor de severidade β , como mais tarde se mostrará.



0.
ma SAFIR
5.



a)



b)

Fig. 8: a) Viga envolvida pelo sistema de aquecimento. b) Resistências eléctricas sobre o perfil.

Na figura 9 estão condensados todos os resultados experimentais obtidos a temperatura elevada sendo claro que a nova proposta, com $\beta = 0.65$, apresenta maior segurança que a curva do Eurocódigo 3.

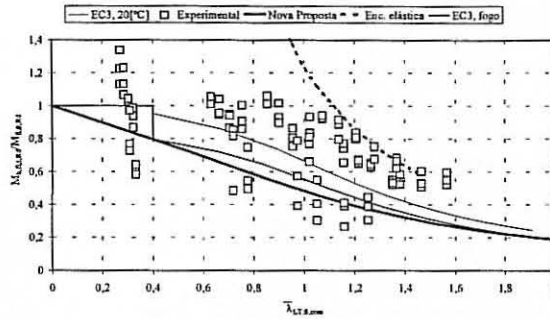


Fig. 9: Curvas de Encurvadura lateral a temperatura elevada. Resultados experimentais.

Os resultados da simulação numérica estão agrupados no gráfico da figura 10, onde mais uma vez se constata ser a nova proposta, com $\beta = 0.65$, mais segura que a curva do Eurocódigo 3.

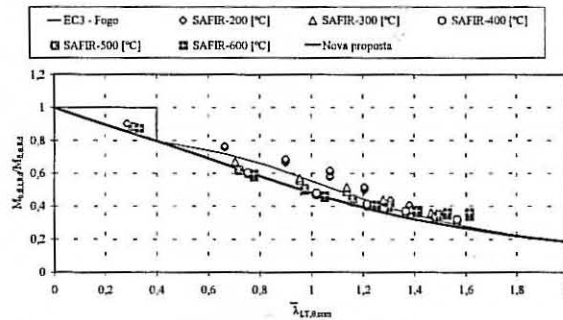


Fig. 10 : Curvas de Encurvadura lateral a temperatura elevada. Resultados numéricos.

Nas figura 11 e 12 comparam-se os resultados obtidos numericamente e experimentalmente com as fórmulas do Eurocódigo 3 e da nova proposta.

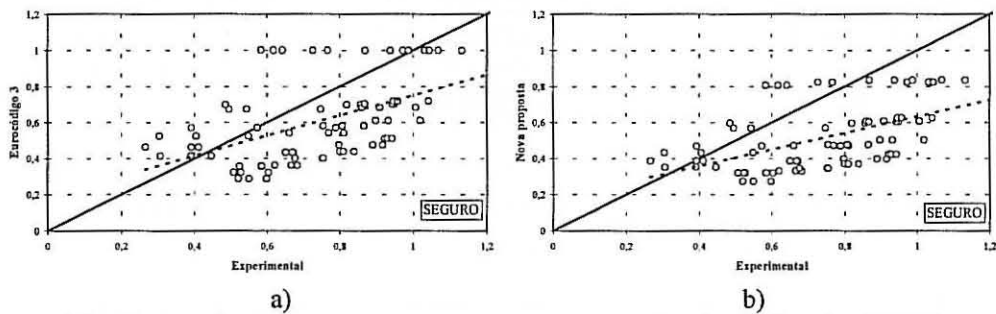


Fig. 11 : Resultados experimentais para temperaturas elevadas (acima de 400 °C).

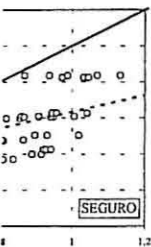
temperatura elevada
que a curva do

experimentais.

onde mais uma
Eurocódigo 3.

numéricos.

experimentalmente



400 °C).

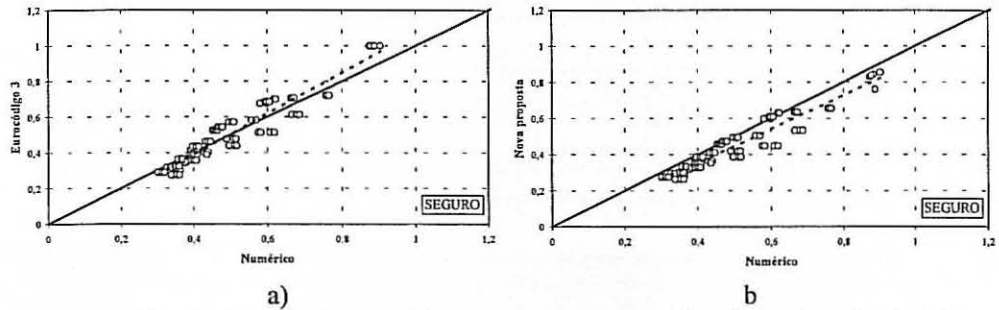


Fig. 12 : Resultados numéricos para temperaturas elevadas (acima de 400 °C).

Pode verificar-se que o número de pontos do lado da segurança é maior no caso da nova proposta do que com as fórmulas do Eurocódigo 3.

É esta nova proposta com $\beta = 0.65$ que foi apresentada ao CEN – Comissão Europeia de Normalização e se encontra em apreciação para adopção na versão final da Parte 1.2 do Eurocódigo 3.

4. CONCLUSÕES

O facto do valor do módulo de elasticidade diminuir mais rapidamente que o valor da tensão de cedência com o aumento da temperatura, acrescido do facto da relação tensão-extensão a temperatura elevada não ser a mesma que à temperatura ambiente provoca uma modificação na forma da curva de encurvadura lateral a temperatura elevada. O patamar horizontal valido a 20 °C até uma esbelteza adimensional de 0.4 desaparece a temperaturas elevadas. A nova proposta com o factor de severidade $\beta = 0.65$ inicialmente sugerido [2] e mais tarde confirmado através de ensaios experimentais e simulações numéricas [3,4] é, como se demonstrou, mais segura que as fórmulas actuais do Eurocódigo 3 [14] tendo sido sugerida ao CEN – Comissão Europeia de Normalização para adopção na versão final da parte 1.2 do Eurocódigo 3.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho desenvolveu-se no âmbito do projecto PRAXIS/P/ECM/14176/1998 financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Agradece-se os apoios do Prof. Mário Vaz no trabalho experimental e da firma J. Soares Correia pela cedência da totalidade dos perfis metálicos ensaiados.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Vila Real, P. M. M. & Franssen, J.-M. - "Lateral buckling of steel I beams under fire conditions - Comparison between the EUROCODE 3 and the SAFIR code", *Internal report No. 99/02*, Institute of Civil Engineering - Service Ponts et Charpents - of the University of Liege, 1999.
- [2] Vila Real, P. M. M. & 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, 2001.
- [3] Vila Real, P. M. M.; Piloto, P A. G.; Franssen, J.-M. - "A Simple Model for the Lateral-Torsional Buckling of Steel I-Beams under Fire Conditions: Numerical and Experimental Validation", comunicação apresentada no XVIII Congresso CTA - Colegio dei Tecnici dell'Acciaio, Ed. ACS ACAI SERVIZI srl, Venezia, Itália, 26 a 28 de Setembro de 2001, pp. 187-196.
- [4] Vila Real, P. M. M.; Piloto, P A. G.; 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, aceite para publicação, Fev. de 2002.
- [5] Timoshenko P.S. & Gere J.M., "Theory of elastic stability"; McGraw Hill Intern. Editions, 1963.
- [6] Trahair N.S., "Flexural - Torsional Buckling of Structures"; E&FN SPON - Chapman & Hall; London, 1993.
- [7] Papangelis, J.P.; Trahair, N.S. & Hancock, G.J.; "Elastic flexural-torsional buckling of structures by computer"; *Journal of Computers and Structures* 68; Pergamon Press; 125-137, 1998.
- [8] C. G. Bailey, I.W. Burgess & R. J. Plank, "The Lateral-torsional Buckling of Unrestrained Steel Beams in Fire", *Journal Construct. Steel Research*, Vol. 36, 1996, pp. 101-119.
- [9] Franssen, J.-M.; "Safir users manual"; ver 1.3, 1995.
- [10] Vila Real, P. M. M. & Franssen, J.-M. - "Lateral buckling of steel I beams at room temperature - Comparison between the EUROCODE 3 and the SAFIR code considering or not the residual stresses", *internal report No. 99/01*, University of Liege, 1999.
- [11] CEN ENV 1993-1-1, "Eurocode 3, Design of Steel Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", 1992.
- [12] Franssen, J.-M.; Schleich, J. B.; Talamona, Didier; Twilt, L. & Both K., (1994) "A comparison between five structural fire codes applied to steel elements", Proc., 4th Int. Symp. On Fire Safety Sci., T. Kashiwagi, ed., IAFSS, Boston, Mass., 1125-1136.
- [13] CEN ENV 1991-2-2, "Eurocode 1, Basis of design and actions on structures - Part 2-2: Actions on structures - Actions on structures exposed to fire", 1995.
- [14] CEN ENV 1993-1-2, "Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-2: General Rules - Structural fire design", 1995.
- [15] 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.
- [16] Franssen, J.-M.; Schleich, J. B. & Cajot, L.-G., "A simple model for fire resistance of axially-loaded members according to Eurocode 3"; *J. Construc. Steel Research*, Vol. 35; pp. 49-69, 1995.