

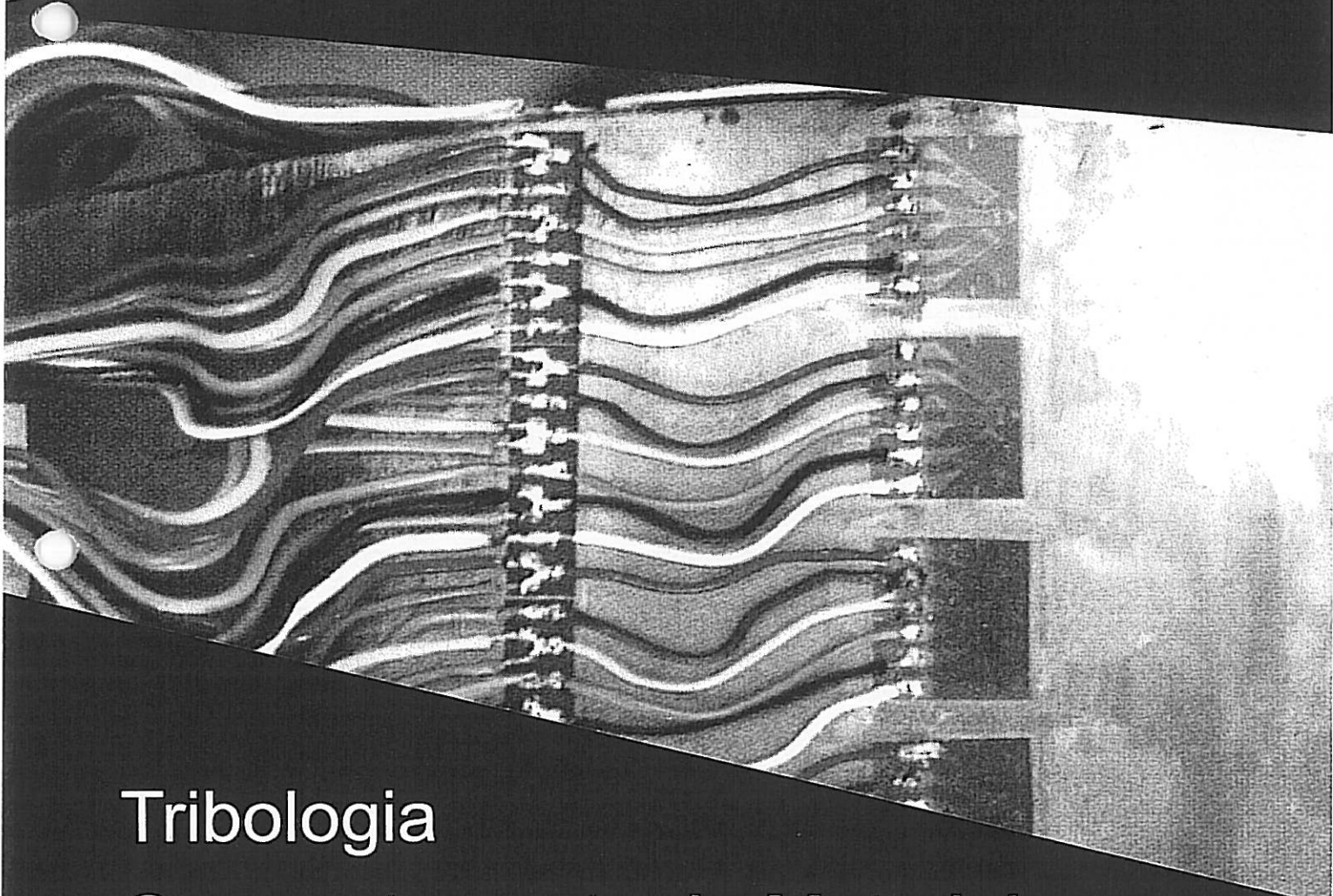
# M

mecânica

# E

experimental

Revista da APAET – Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões



Tribologia

Comportamento de Materiais e  
Estruturas

nº 4  
1999

**CORPO EDITORIAL:**

Prof. J. Sousa Cirne (FCTUC)  
Prof. Fernando Branco (IC/IST)  
Prof. J. Silva Gomes (INEGI)  
Engº Mário Santos (INETI)  
Engº J. M. Catarino (LNEC)  
Drº M. Lurdes Eusébio (LNEC)  
Eng. Paulo Azenha (PROFABRIL)

**M**  
mecânica

**E**  
experimental

**COMISSÃO CIENTÍFICA:**

M. Conceição Cruz Azevedo  
Fernando Branco  
P. Tavares de Castro  
J. Sousa Cirne  
J. M. Catarino  
M.J. Esteves Ferreira  
J. Silva Gomes  
A. Torres Marques  
Mário Santos  
J. Montalvão e Silva  
Luciano Faria  
A. Morão Dias  
J. Sarmento  
M. Seabra Pereira  
A. Sousa Miranda  
J. Oliveira Pedro  
R.A.F. Martins

Foto:

Pormenor da instalação de rosetas de extensómetros num componente estrutural (cortesia do INEGI, Porto)

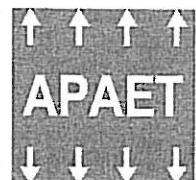
Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões

c/o Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. do Brasil, 101 - 1799 LISBOA CODEX

e-mail: [apaet@lnec.pt](mailto:apaet@lnec.pt)

<http://www-ext.lnec.pt/APAET/>

**Nº 4  
1999**



**ISSN - 122 922**

A Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET) foi fundada em 1982 com os seguintes objectivos:

- 1 - Promover a cooperação científica e técnica no campo do conhecimento experimental da Mecânica Estrutural e, particularmente, da Análise Experimental de Tensões, visando o desenvolvimento e emprego dos aparelhos de medida e dos processos destinados à determinação das tensões em materiais e em todos os tipos de estruturas e mecanismos ou seus componentes.
- 2 - Assegurar a representação portuguesa no European Permanent Committee for Experimental Mechanics (EPCEM), na Society for Experimental Mechanics (SEM) e na International Measurement Confederation (IMEKO).

A Revista "Mecânica Experimental" foi criada pela Direcção desta Associação, com o objectivo de fomentar a publicação de artigos originais de qualidade que promovam a divulgação de informação e o intercâmbio científico e técnico entre os investigadores de língua portuguesa que nos seus trabalhos recorram a técnicas experimentais.

### CORPOS GERENTES DA APAET (1999-2001)

**Mesa da Assembleia Geral** - Presidente: IDMEC (Prof. Luciano Faria); Secretários: GAPRES e IPB

**Direcção** - Presidente: INEGI (Prof. J. Silva Gomes); 1º Vice-Presidente: FCTUC (Prof. J. Sousa Cirne); 2º Vice-Presidente: IC/IST (Prof. Fernando Branco); Tesoureiro: LNEC (Engº J. M. Catarino); Vogais: INETI (Engº Mário Santos) e PROFABRIL (Eng. Paulo Azenha); Secretário: Drª Maria de Lurdes Eusébio;

**Conselho Fiscal** - Presidente: ACADEMIA MILITAR (Prof. Carlos Silva Lima); Secretário: JAE; Vogal: UM.

### ÍNDICE

<b>Avaliação da Capacidade de Absorção de Energia de Betões Reforçados com Fibras de Aço</b> <i>J.P.O. Barros, J. Sena Cruz, Erik Ulrix</i>	1
<b>Comportamento à Fadiga da Liga de Alumínio 608</b> <i>Luis F.P. Borrego, José D.M. Costa, José A.M. Ferreira</i>	13
<b>Comportamento à Fadiga de Juntas Soldadas da Liga de Alumínio A1 6061-T651</b> <i>A. Silva Ribeiro, José D.M. Costa, A. Augusto Fernandes</i>	23
<b>Encurvadura Lateral de Vigas Metálicas Sujeitas à Acção do Fogo - Estudo Numérico e Experimental</b> <i>Vila Real, P.M.M.; Piloto, A.G.; Franssen, J.M.; Vaz, M.A.P.; Oliveira, F.M.F.</i>	31
<b>Estudo Fotoelástico do Campo de Tensões em Ligações Adesivas Estruturais</b> <i>J.E. Ribeiro, J.L. Esteves</i>	41
<b>Reologia de Suspensões Tixotrópicas de Base Argilosa (Laponite)</b> <i>A.S. Pereira, F.T. Pinho</i>	51
<b>Estudo Comparativo do Comportamento de Óleos Base e Massas Lubrificantes em Contactos Elastohidrodinâmicos</b> <i>Luis Andrade Ferreira</i>	65
<b>Estudo do Atrito Limite entre Materiais em Situação de Rodagem</b> <i>I. Nogueira, A. Morão Dias, R. Gras, R. Progni</i>	71
<b>Fissuração de Superfícies em Ferro Nodular Austemperado (ADI) Sujeito a Contactos do Tipo Hertziano</b> <i>L. Magalhães, J. Seabra</i>	79
<b>Influência da Viscosidade e da Massa Específica do Lubrificante na Gripagem de Engrenagens FZG - A</b> <i>J. Castro, J. Seabra</i>	91
<b>Validação Experimental de Modelos de Cálculo de Estruturas Sandwich</b> <i>Ferreira, A.J.M.; Marques, A.T.; César de Sá, J.; Barbosa, J.A.T.</i>	101
<b>Determinação de Propriedades de Rigidez de Compósitos de Matriz de Époxido Reforçados com Fibra Entrelaçada</b> <i>J. A. Simões, A. T. Marques</i>	111

# Encurvadura Lateral de Vigas Metálicas Sujeitas à Acção do Fogo – Estudo Numérico e Experimental

Vila Real, P. M. M. <sup>\*</sup>; Piloto, P. A. G. <sup>\*\*</sup>; Franssen, J. M. <sup>\*\*\*</sup>;  
Vaz, M. A. P. <sup>\*\*\*\*</sup>; Oliveira, F. M. F. <sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro - Portugal

<sup>\*\*</sup> Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança - Portugal

<sup>\*\*\*</sup> Institut du Génie Civil - Service "Ponts et Charpentés", Université de Liège - Bélgica

<sup>\*\*\*\*</sup> Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, FEUP, Porto - Portugal

## RESUMO

*O problema da encurvadura lateral de vigas metálicas sujeitas a altas temperaturas, nomeadamente as que resultam de situações de incêndio, é ainda mal conhecido. O Eurocódigo 3 apresenta na Parte 1-2 um modelo de cálculo simples cuja validade nunca foi confirmada experimentalmente. Comparam-se os resultados obtidos com a utilização de um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material especialmente desenvolvido para o estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo, com os resultados obtidos com base naquele Eurocódigo. Foram considerados dois tipos de aço, um perfil I da série europeia, um tipo de carregamento e quatro períodos de exposição à curva de incêndio padrão ISO 834. Com base neste estudo numérico foi possível obter uma nova proposta de modelo de cálculo simples, diferente do sugerido no Eurocódigo 3, e que necessita ainda ser validada experimentalmente. Apresenta-se uma descrição dos ensaios experimentais que deverão ser realizados tendo em vista a validação do modelo de cálculo simples proposto neste trabalho.*

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar do problema da encurvadura lateral das vigas metálicas, à temperatura ambiente ser actualmente bem conhecido [1], o mesmo problema, quando as vigas estão sujeitas a elevadas temperaturas não está ainda bem estudado.

Apresentam-se neste trabalho os primeiros resultados obtidos no âmbito de um projecto destinado a estudar o

fenómeno da encurvadura lateral de vigas metálicas sujeitas à acção do fogo.

Faz-se a proposta de um novo modelo de cálculo simples para cálculo da resistência à encurvadura lateral de vigas metálicas em situação de incêndio, baseada em resultados numéricos obtidos com o programa SAFIR [2], um código de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, desenvolvido na Universidade de Liège especialmente para

o estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo.

A capacidade deste programa para simular a encurvadura lateral de vigas metálicas à temperatura ambiente foi demonstrada na ref. [3], onde se comparam os resultados numéricos com os resultados obtidos com o Eurocódigo 3, Parte 1-1 [4].

Estudou-se uma viga simplesmente apoiada sujeita a uma distribuição de momentos uniforme (Fig. 1). Trata-se de um perfil IPE 220 com apoios que impedem os deslocamentos laterais e a rotação, segundo o eixo longitudinal do perfil, das secções nas extremidades.

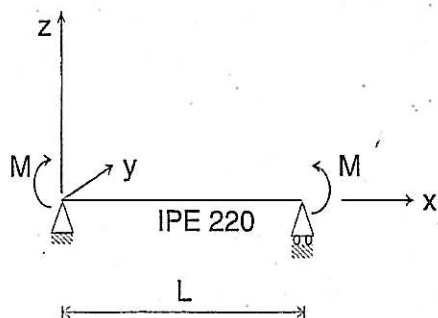


Fig. 1 - Viga tridimensional simplesmente apoiada, sujeita a momentos nas extremidades.

Admitiu-se que a viga estava sujeita, nos quatro lados, à curva de incêndio padrão ISO 834 [5], sendo os resultados numéricos comparados com os resultados obtidos através das fórmulas do Eurocódigo 3, Parte 1-2 [6], 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 [7-9] e as tensões residuais foram tidas em consideração de acordo com a referência [10].

## 2. RESULTADOS NUMÉRICOS

### 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 [6]. 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 banço comprimido,  $\theta_{a,com}$ , atingida no instante  $t$ , seja superior a 0.4, 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;

$w_{pl,y}$  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 banço comprimido,  $\theta_{a,com}$ , atingida no instante  $t$ ;

$\gamma_{M,fi}$  é o factor parcial de segurança em situação de incêndio (geralmente  $\gamma_{M,fi} = 1$ ).

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

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}} \quad (2)$$

onde

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

$k_{E,\theta,com}$  é o factor de redução do módulo de Young à temperatura máxima no banço 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 vertical está representada a relação

$$\frac{M_{b,fi,t,Rd}}{M_{fi,\theta,Rd}} \quad (3)$$

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  $\theta_a$  é dado por:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} M_{Rd} \quad (4)$$

onde,  $\gamma_{M0} = 1.0$ ,  $\gamma_{M,fi} = 1.0$  e  $M_{Rd}$  é o momento plástico  $M_{pl,Rd}$  à temperatura ambiente, dado por

$$M_{Rd} = \frac{w_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5)$$

onde  $\gamma_{M0} = 1.0$ .

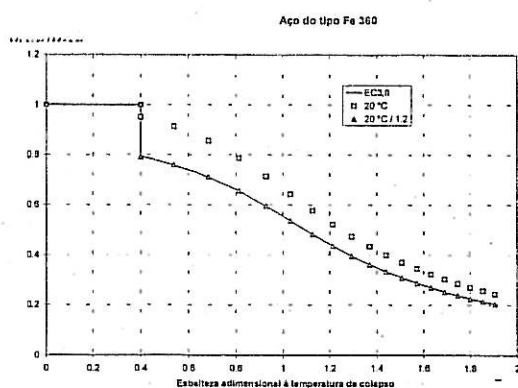


Fig. 2 – Curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3, em situação de incêndio (EC3,fi) e à temperatura ambiente (20°C).

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

obtem 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  $M_{b,fi,t,Rd} / M_{fi,\theta,Rd}$  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:

$$\frac{M_{b,fi,t,Rd}}{M_{fi,\theta,Rd}} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2}, \text{ para os resultados do Eurocódigo 3, Parte 1-2} \quad (6)$$

ou

$$\frac{M_{SAFIR}}{M_{fi,\theta,Rd}}, \text{ para os resultados do programa SAFIR} \quad (7)$$

## 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 obtêm 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  $0.3 \times 235$  [Mpa] [10] para

ambas as qualidades de aço consideradas, Fe 360 e Fe 510.

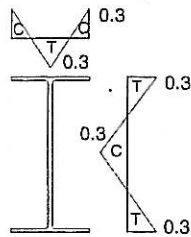
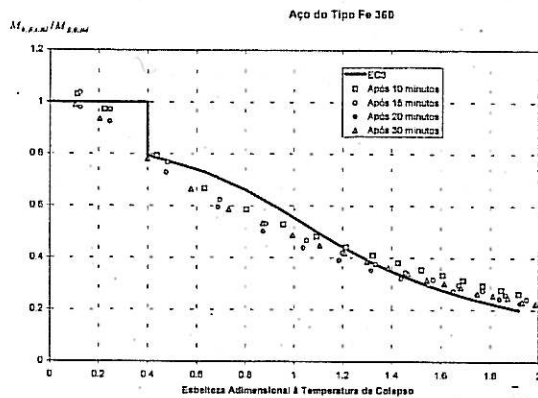
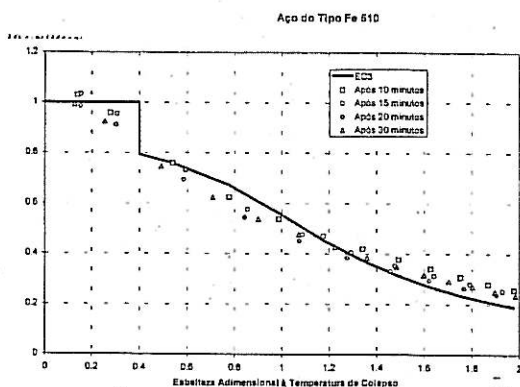


Fig.3 – Tensões residuais. C – compressão; T – tração.

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).

Pode constatar-se na Figura 4 que os valores obtidos com o programa SAFIR quando se considera o aço do tipo Fe 510 são superiores aos valores obtidos quando se considera o aço do tipo Fe 360. De acordo com a referência [9] “isto é devido ao facto das tensões residuais não dependerem da tensão de cedência do aço. A sua influência relativa é menor quando a tensão de cedência aumenta. Este fenómeno não é tido em conta no modelo simplificado do Eurocódigo 3, onde o coeficiente de encurvadura não varia com a tensões de cedência”.

A razão pela qual na figura 4 o cociente  $M_{SAFIR} / M_{fi,\theta,Rd}$ , para pequenos valores da esbelteza adimensional e para os instantes de tempo de 10 e 15 minutos, é maior do que 1 tem a ver com o facto do campo de temperaturas obtido com o programa SAFIR não ser uniforme, apresentando temperaturas nos banzos menores do que a temperatura dada pela equação simplificada do Eurocódigo 3 e aqui utilizada para calcular  $M_{fi,\theta,Rd}$ . Este efeito, que é favorável relativamente à resistência da viga à encurvadura lateral, tende a desaparecer para tempos de exposição ao fogo superiores pois os gradientes térmicos na secção tendem também a diminuir.

### 2.3 Nova proposta

Adoptando para a encurvadura lateral de vigas a mesma proposta de Franssen et al [9] 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:

$$M_{b,\beta,t,Rd} = \chi_{LT,\beta} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,\beta}} \quad (8)$$

onde

$$\chi_{LT,\beta} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (9)$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2] \quad (10)$$

e

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

$\bar{\lambda}_{LT}$  é a esbelteza adimensional à temperatura ambiente e  $\alpha = \beta \varepsilon$  o factor de imperfeição;  $\beta$  o factor de severidade, a ser escolhido de modo a assegurar um nível de segurança apropriado;

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ , sendo  $f_y$  a tensão de cedência em [MPa].

Comparando as equações (1) e (8) pode verificar-se que nesta nova proposta não se usa a constante empírica de 1.2 que é utilizada como factor de correcção no Eurocódigo 3.

As equações (9) e (10) são exactamente as mesmas que o Eurocódigo 3, Parte 1-1 define para temperatura ambiente, excepto que o limite de 0.2 para  $\bar{\lambda}_{LT}$  não aparece na equação (10). Este facto altera a forma da curva de encurvadura lateral. Esta nova curva começa com um valor de  $\chi_{LT} = 1.0$  para  $\bar{\lambda}_{LT} = 0.0$  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  $\varepsilon$  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 [9] 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 [11,12].

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.

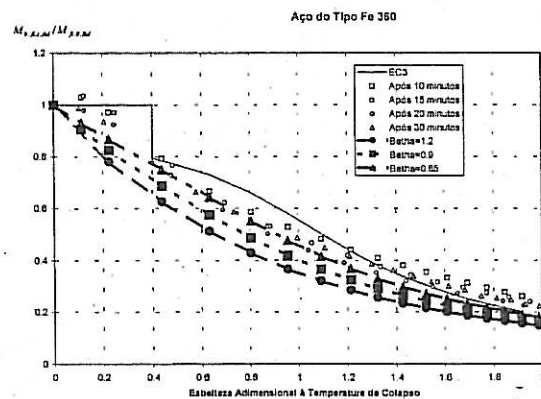
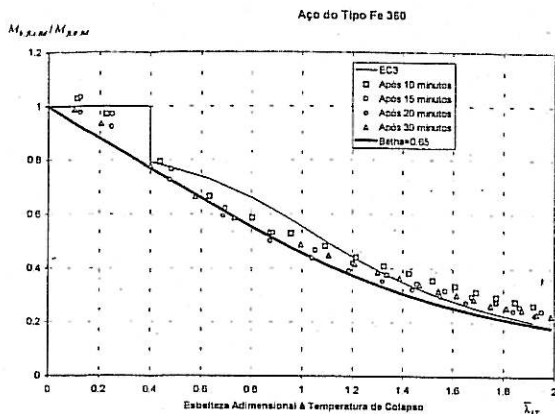


Fig. 5 – Curvas de encurvadura lateral obtidas com o Eurocódigo 3, o programa SAFIR. (após 10, 15, 20 e 30 minutos) e com a nova proposta.

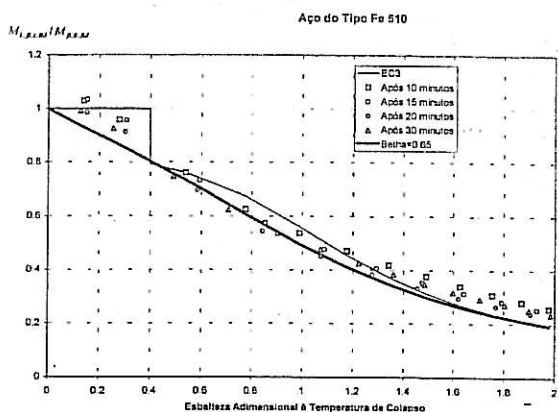
O facto de se adoptar para o caso da encurvadura lateral de vigas, o mesmo valor do coeficiente de severidade adoptado na ref. [9] para o caso da encurvadura de colunas, conduz à mesma filosofia que o Eurocódigo 3 actualmente adopta, isto é, usar as mesmas fórmulas para o factor de redução  $\chi$ , quer se trate de encurvadura de colunas ou de encurvadura lateral de vigas.

Para que esta nova proposta que agora se apresenta possa vir a ser aceite necessita ainda de um estudo numérico mais alargado em que se considerem outras dimensões para os perfis metálicos, outros casos de carregamento e obviamente deve ser validada através de resultados obtidos

experimentalmente. É o que nos propomos fazer com os ensaios experimentais que a seguir se descrevem.



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  $\beta = 0.65$ .

### 3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS A REALIZAR

O objectivo principal dos ensaios experimentais é o de validar os resultados numéricos e consequentemente a nova proposta de cálculo simples sugerida no ponto 2.3 deste trabalho.

Para o aquecimento das vigas, necessário ao estudo do problema da encurvadura lateral em situação de incêndio, são possíveis duas soluções distintas: a utilização de fornalhas convencionais ou a utilização de resistências eléctricas. A primeira destas soluções não é viável, pois no nosso País não existem fornalhas para esse efeito, pelo que deverá recorrer-se a resistências

eléctricas para aquecer as vigas. Esta solução, para além de mais simples apresenta ainda outras vantagens:

- a possibilidade de utilizar o mesmo pórtico dos ensaios realizados à temperatura ambiente;
- a dimensão das vigas não tem de estar limitada à dimensão da fornalha;
- a temperatura da viga é muito mais homogênea pois pode ser controlada resistência a resistência;
- há uma maior fiabilidade na medição dos deslocamentos;
- os ensaios são mais fáceis de realizar, pelo que a cadência dos mesmos pode ser mais elevada.

Os perfis em estudo serão, assim, aquecidos através de um conjunto de equipamentos baseados em aparelhos necessários para gerar a energia a ceder à fonte de calor, um controlador da variação da temperatura, várias resistências eléctricas, o isolamento térmico, e um conjunto de acessórios de montagem e de funcionamento, conforme figura 7.

A unidade necessária deverá ser capaz de responder a cerca de 24 resistências de 2,7 [kW] de potência, ou seja, cerca de 64,8 [kVA]. Este centro de aquecimento deverá ser capaz de ligar 6 grupos de 4 resistências de aquecimento, em paralelo, cada uma delas com uma área de transferência de calor de 305 [mm] x 165 [mm]. Cada um destes grupos de resistências funciona a uma tensão de 240 [V], consome uma corrente de 45 [A], sendo capaz de atingir os 1050 [°C], ou seja, valores suficientemente elevados para garantir uma evolução térmica segundo a curva nominal ISO 834.

A unidade necessária deverá ser capaz de responder a cerca de 24 resistências de 2,7 [kW] de potência, ou seja, cerca de 64,8 [kVA]. Este centro de aquecimento deverá ser capaz de ligar 6 grupos de 4 resistências de aquecimento, em paralelo, cada uma delas com uma área de transferência de calor de 305 [mm] x 165 [mm]. Cada um destes grupos de resistências funciona a uma tensão de 240 [V],

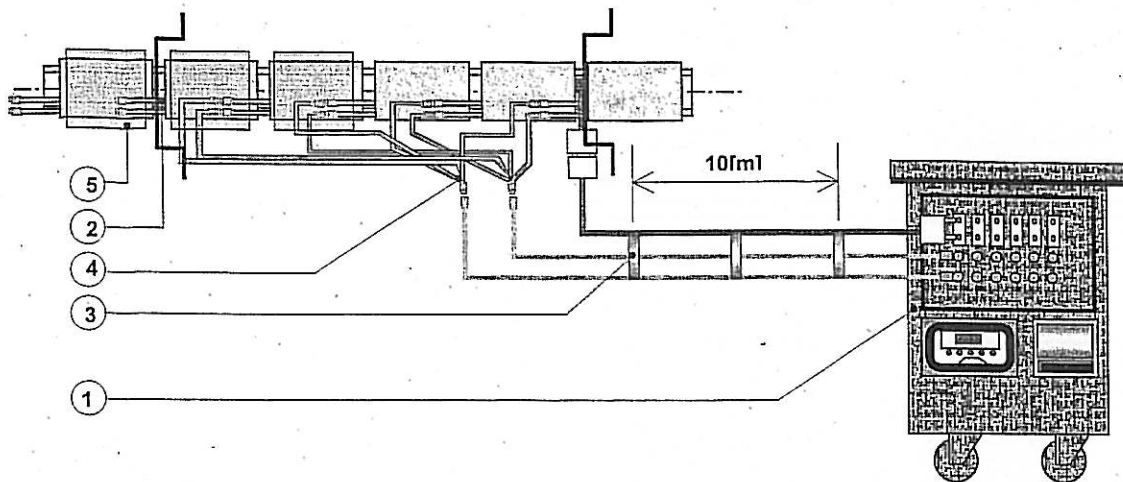


Fig.7- Esquema de montagem do equipamento para aquecimento: 1- Centro de aquecimento térmico, 2- mantas cerâmicas flexíveis de aquecimento, 3- Cabos de distribuição de energia, 4- cabos divisores, 5- Mantas de isolamento térmico.

consome uma corrente de 45 [A], sendo capaz de atingir os 1050 [°C], ou seja, valores suficientemente elevados para garantir uma evolução térmica segundo a curva nominal ISO 834.

Para controlar a temperatura dos perfis, o centro de aquecimento dispõe de um controlador programável, capaz de regular o aquecimento e o arrefecimento através do tempo.

Para registar todo o processo de evolução térmica, o centro de aquecimento deverá dispor de um registador, de 12, ou 24 canais, para termopares do tipo "K".

A ligação do centro de aquecimento às resistências é feito através de cabos de distribuição que variam conforme a montagem.

Para garantir maior rendimento no processo, será necessário isolar as resistências com material de fibra cerâmica com malha de aço inoxidável.

A parte estrutural e todo o equipamento de potência mecânica recorrerá a um sistema servo-hidráulico com actuadores e transdutores de força, devendo permitir a montagem prevista na figura 8.

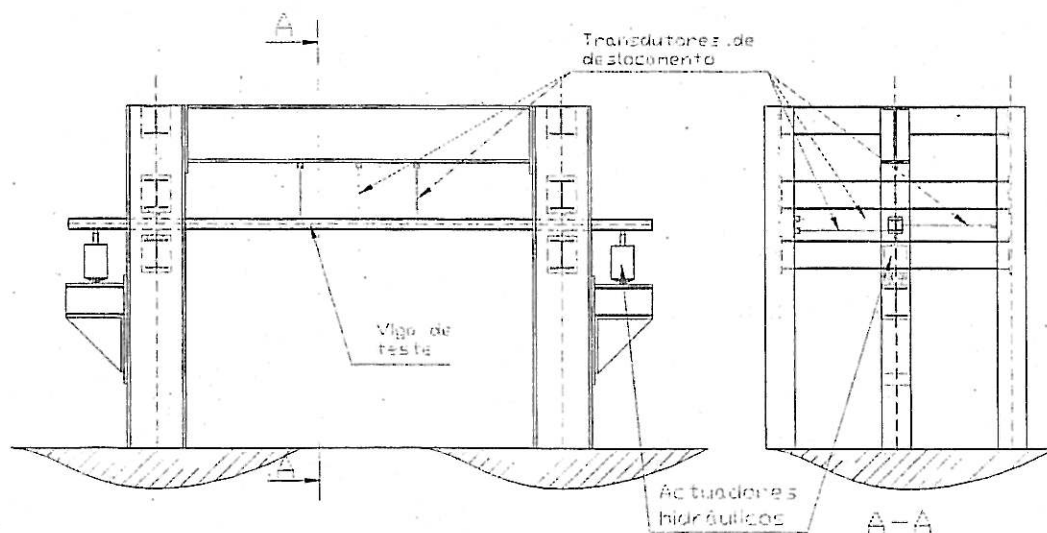


Fig.8 - Esquema de montagem dos ensaios.

O sistema de ensaios deve ser calibrado através da realização de dois testes preliminares. Num primeiro teste, a viga deve ser aquecida sem carregamento, para que se quantifiquem as deformações, de apoios e suportes, resultantes do processo de aquecimento. Um segundo teste deve ser feito para verificar o sistema de medição das forças e deslocamentos, à temperatura ambiente.

Estão previstos dois tipos de ensaios:

- i) solicitar mecanicamente as vigas apenas após estas terem estabilizado a temperatura em valores pré definidos;
- ii) solicitar, primeiro, mecanicamente as vigas e depois impor-lhe o aquecimento, de acordo com a curva de incêndio padrão ISO 834.

Dadas as tolerâncias de forma e dos valores das características mecânicas que as normas de qualidade dos perfis de aço prevêm, tencionamos fazer o levantamento geométrico e dimensional de cada um dos perfis que for submetido a ensaio bem como medir os valores das tensões de cedência de cada um dos elementos geométricos, banzo e alma, que os compõem. Porque os valores das tensões residuais são considerados na simulação numérica conforme indicado no ponto 2.2, procuraremos confirmar, alguns desses valores, nalguns dos perfis em que seja previsível uma melhor adequação dos métodos disponíveis e aconselhados para o efeito.

As forças, os deslocamentos verticais e horizontais, bem como as rotações da secção recta em torno do eixo longitudinal deverão ser registados durante os ensaios.

#### 4 CONCLUSÕES

O facto das propriedades mecânicas do aço depender da temperatura e da relação tensão-deformação a altas temperaturas não ser a mesma que à temperatura ambiente, altera a forma da curva de encurvadura lateral a altas temperaturas. O patamar que esta curva apresenta até à esbelteza adimensional de

0.4, válido a 20°C, desaparece no caso de temperaturas elevadas, como ficou demonstrado através dos resultados numéricos. O modelo de cálculo simples proposto no Eurocódigo 3 e que é válido à temperatura ambiente conduz a níveis de segurança que dependem da esbelteza da viga, não estando os resultados do lado da segurança para valores intermédios da esbelteza.

Apresentou-se uma nova proposta para a curva de encurvadura lateral de vigas metálicas I, sujeitas a fogo, baseada no modelo sugerido na ref. [9] para colunas metálicas H sujeitas a carga axial. Nesta proposta a curva de encurvadura lateral baseada no factor de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio e na esbelteza adimensional calculada à temperatura de colapso, depende do tipo de aço, contrariamente ao que acontece no Eurocódigo 3, Parte 1-2.

Encontrou-se o mesmo valor de  $\beta = 0.65$ , para factor de severidade que o utilizado no caso de colunas carregadas axialmente na ref. [13], o que nos conduz à mesma filosofia adoptada no Eurocódigo 3, isto é, usar as mesmas fórmulas para factor de redução, quer se trate de encurvadura de colunas ou de encurvadura lateral de vigas.

Deve realçar-se o facto do valor do factor de severidade  $\beta$  da proposta apresentada neste trabalho ter sido obtido analisando-se apenas o comportamento do perfil IPE 220, pelo que é desejável que se façam mais análises numéricas, considerando outros tipos de perfil.

Por outro lado é desejável também que os resultados numéricos sejam validados através de resultados experimentais. É o que se pretende fazer futuramente com os ensaios experimentais descritos neste trabalho.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as facilidades concedidas pela Universidade de Liège, durante a realização do trabalho numérico

bem como o apoio financeiro da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

## REFERÊNCIAS

1. Eurocode 3 – Design of steel structures. Part 1 – General rules and rules for buildings. Background documentation. Cap. 5 document 5.03. Evolution of test results on beams with cross-sectional classes 1 – 3 in order to obtain strength functions and suitable model factors – October 1989.
2. Jean-Marc Franssen, PROGRAM SAFIR, Ver. 1.3, User's Manual, Université de Liege, Institut du Genie Civil, Service "Ponts et Charpentes", Dec. 1996.
3. Paulo M. M. Vila Real, Jean-Marc Franssen – "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, Institute of Civil Engineering – Service Ponts et Charpentes – of the University of Liege, Jan. 1999.
4. 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.
5. Eurocode 1, Basis of design and actions on structures – Part 2-2: Actions on structures – Actions on structures exposed to fire. Draft ENV 1991-2-2:1995, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, 1995.
6. Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2. General rules and rules for buildings. Structural fire design. Draft ENV 1993-1-2, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, 1995.
7. D. Talamona, J. M. Franssen, J. B. Schleich, J. Kruppa, "Stability of Steel Columns in Case of Fire: Numerical Modelling", Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 6, pp. 713-720, Jun. 1997.
8. Jean-Marc Franssen, "Contributions a la Modelisation des Incendies dans les Batiments et de Leurs Effects Sur les Structures"; Thèse présentée en vue de l'obtention du grade d'Agrégé de l'Enseignement Supérieur, Année académique 1997-1998.
9. Jean-Marc Franssen, Jean-Baptiste Schleich & Louis-Guy Cajot, "A Simple Model for Fire Resistance of Axially-loaded Members According to Eurocode 3", Journal Construct. Steel Research, Vol. 35, pp. 49-69, 1995.
10. 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.
11. Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-2: Règles générales – Calcul de comportement au feu, DAN belge, Juillet 1998.
12. Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-2: Règles générales – Calcul de comportement au feu, Document D'Application Nationale française.
13. Jean-Marc Franssen, Jean-Baptiste Schleich, Louis-Guy Cajot & Wenceslao Azpiazu "A Simple Model for Fire Resistance of Axially-loaded Members – Comparison with Experimental Results", Journal Construct. Steel Research, Vol. 37, pp. 175-204, 1996.