



Construção
Metálica
e Mista 3

ANTÓNIO LAMAS

PAULO VILA REAL

LUÍS SIMÕES DA SILVA

Construção Metálica e Mista 3

Actas do III Encontro de
Construção Metálica e Mista

Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal
6 e 7 de Dezembro, 2001

António Lamas
Departamento de Engenharia Civil
Instituto Superior Técnico
Lisboa, Portugal

Paulo Vila Real
Secção Autónoma de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal

Luís Simões da Silva
Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

cm m – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Secção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Construção Metálica e Mista 3

Copyright © 2001 por António Lamas, Paulo Vila Real, Luís Simões da Silva

Editora:

cmm - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Palácio de Vila Flor, Av. D. Afonso Henriques
4810-431 Guimarães, Portugal
Tel. +351 253 415142 – Fax +351 253 415389
Internet: <http://www.cmm.pt>
e-mail: geral@cmm.pt

1ª Edição
Dezembro, 2001

Tiragem: 400 exemplares

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo electrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

Depósito Legal: 173320/01
ISBN: 972-98376-2-7

Coordenação Editorial: Paulo Vila Real
Concepção Gráfica da Capa: A. Rui J.
Paginação: Fundação João Jacinto de Magalhães
Impressão: Tipave, Indústrias Gráficas de Aveiro, Lda.

Nota da Editora

Este texto foi elaborado a partir da reprodução fotográfica dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, a editora não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo, nem por possíveis erros no texto.

Comissões
Exposição Técnica
Patrocínios
Prefácio

SECÇÃO I

- European Re
Concrete Stru
Plumier, André
- Nuevo Puente
Prieto, Pablo F
- Steelworks in
Mazzolani, Fe
- Fire Safe Des
Schleich, Jean
- A Construção
Mota Freitas, .
- Presentation
Gendebien, G
- Construir co
Castanheira, C
- Estádios par
Reis, A. J.
- Promover o
Lamas, Antón
- Ponte Pedon
Fonseca, A. A
- Ponte Pedon
Graça, J. L. C

SECÇÃO II

- Experiment
Majowiecki,
- Cobertura c
Abecasis, Ti
- Coberturas
Silva, Antón



ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS NA ENCURVADURA LATERAL DE VIGAS "I" METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Vila Real, Paulo M. M.¹; Cazeli, Ronisi²; Silva, Luís S. da³; Piloto, P. A. G.⁴

RESUMO

Como é do conhecimento geral os fenómenos de instabilidade são influenciados pela presença de tensões residuais. Faz-se um estudo numérico desta influência na resistência de vigas metálicas "I" à encurvadura lateral em situação de incêndio. Utiliza-se para o efeito o programa SAFIR que é um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material de estruturas sujeitas à acção do fogo. Os resultados obtidos por esse programa são comparados com os resultados obtidos pelo método simplificado de cálculo apresentado na parte 1.2 do Eurocódigo 3. Esse último modelo conduz a níveis de segurança que dependem da esbelteza adimensional dos elementos estruturais, não estando os resultados do lado da segurança para uma certa gama de valores dessa esbelteza quando comparados com os resultados numéricos. Neste estudo foi considerado o perfil da série europeia IPE 220 em aço S235, correspondente a uma viga simplesmente apoiada, submetida exclusivamente a flexão pura. Analisou-se também a validade de uma nova proposta de modelo de cálculo simples, que garante resultados mais seguros quando comparados com os obtidos com base na versão actual do Eurocódigo 3 – parte 1.2.

1. INTRODUÇÃO

Entre os vários factores que influenciam a estabilidade lateral das vigas podemos citar os seguintes:

- Empenamento longitudinal da viga;
- Torção inicial da secção transversal da viga;
- Excentricidades acidentais das cargas;
- Plastificação prematura devido à presença de tensões residuais.

¹ Prof. Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

² Engenheira Civil, MSc, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

³ Prof Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra

⁴ Prof. Adjunto do Departamento de Mecânica Aplicada do Instituto Politécnico de Bragança

A resistência de uma viga à encurvadura lateral elástica aumenta à medida que a sua esbelteza diminui, no entanto a viga pode plastificar antes mesmo de se atingir a carga de encurvadura elástica. De facto, esta plastificação provocada por uma combinação das tensões induzidas pelas cargas aplicadas com as possíveis tensões residuais resultantes por exemplo do processo de fabrico reduz a rigidez aos movimentos laterais fazendo diminuir a resistência à encurvadura lateral para valores abaixo da sua resistência elástica como mostra a figura 1.

À temperatura ambiente sabe-se assim que o efeito das tensões residuais se faz sentir com maior intensidade para valores intermédios da esbelteza das vigas. Este comportamento, largamente comprovado experimentalmente [1] foi também por nós confirmado numericamente, como se verá.

A temperaturas elevadas o fenómeno da encurvadura lateral de vigas não está ainda suficientemente estudado, pelo que nos propusemos fazer, neste trabalho, uma investigação numérica da influência das tensões residuais na encurvadura lateral de vigas I em aço, quando sujeitas a altas temperaturas.

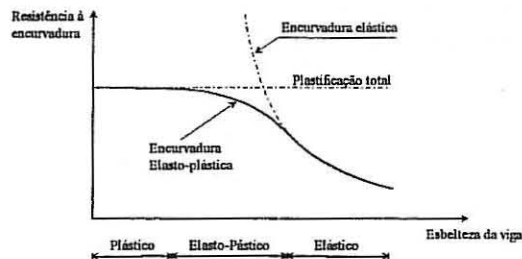


Fig. 1 – Variação da resistência à encurvadura lateral com a esbelteza da viga. Efeito das tensões residuais.

2. CASO ESTUDADO

Com o objectivo de estudar a influência das tensões residuais na encurvadura lateral de vigas I metálicas sujeitas a altas temperaturas, foram estudadas vigas IPE 220 de aço S235 simplesmente apoiadas com apoios de forquilha que impedem a rotação em torno do eixo longitudinal mas permitem o empenamento da secção transversal. Submeteram-se as vigas a momentos nas extremidades como mostra a figura 2.

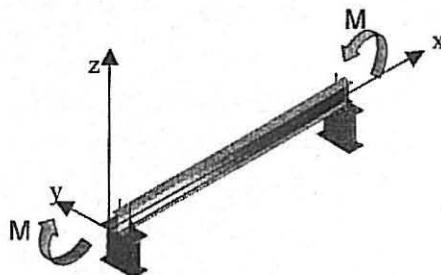


Fig. 2 – Viga tridimensional simplesmente apoiada, sujeita a momentos nas extremidades.

Para além de uma análise à temperatura ambiente (20 °C), foram consideradas também na modelação numérica temperaturas uniformes em toda a secção transversal das vigas compreendidas entre 200 °C e 700 °C.

Consider
tipo sinusoidal s

em que l é o vão

3. O PROGRAMA

Fez-se a
programa de ele
Universidade de
com os resultac
proposta de cál
Piloto [7,8].

O progr
quinze graus de
nos dois nós dos
tratar a compon

A secçã
elementos plan
permitindo a ut
residuais.

Adoptou
os valores aí apr

Numeric
equilibrada repr

edida que a sua
ngir a carga de
ção das tensões
es por exemplo
uir a resistência
ra a figura 1.
ais se faz sentir
comportamento,
is confirmado

não está ainda
na investigação
em aço, quando

irvadura lateral
20 de aço S235
torno do eixo
m-se as vigas a

idades.

leradas também
ersal das vigas

Considerou-se que as vigas apresentavam uma imperfeição geométrica longitudinal do tipo sinusoidal seguindo uma curva dada pela expressão

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

em que l é o vão livre das vigas.

3. O PROGRAMA SAFIR

Fez-se a comparação dos resultados numéricos obtidos pelo programa SAFIR [2], um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, desenvolvido na Universidade de Liège especialmente para o estudo de estruturas em situação de incêndio, com os resultados obtidos segundo a parte 1.2 do Eurocódigo 3 [3] e segundo uma nova proposta de cálculo simples apresentada por Vila Real et al. [5,6] e mais tarde confirmada por Piloto [7,8].

O programa SAFIR usa um elemento finito de viga tridimensional com três nós e quinze graus de liberdade sendo sete graus (3 deslocamentos, 3 rotações e 1 empenamento) nos dois nós dos extremos e um grau de liberdade no nó central, sendo este último destinado a tratar a componente não linear do deslocamento axial.

A secção transversal do elemento finito de viga utilizado foi discretizada em elementos planos lineares (quadrangulares ou triangulares) como se mostra na figura 3, permitindo a utilização do modelo de fibras com o qual é possível introduzir as tensões residuais.

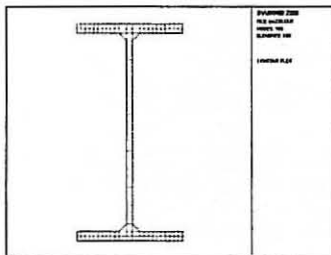


Fig.3 - Discretização da secção transversal da viga.

Adoptou-se a distribuição de tensões residuais representada na figura 4 [3], devendo os valores aí apresentados ser multiplicados pela tensão de cedência do aço S235.

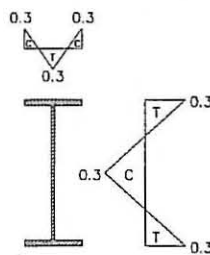


Fig. 4 - Distribuição de tensões residuais . C - compressão; T - tração.

Numericamente aquela distribuição de tensões foi aproximada pela distribuição auto-equilibrada representada na figura 5.

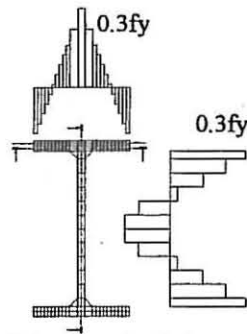


Fig. 5 - Distribuição aproximada das tensões residuais.

4. ENCURVADURA LATERAL SEGUNDO O EUROCÓDIGO 3

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 , seja superior a 0.4, calcula-se de acordo com:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (2)$$

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 banzo comprimido, $\theta_{a,com}$, atingida no instante t ;
- $\gamma_{M,fi}$ é o factor parcial de segurança em situação de incêndio (geralmente $\gamma_{M,fi} = 1$).

A constante 1.2 na eq. (2) 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

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,\theta,com}}{k_{E,\theta,com}}} \quad (3)$$

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 banzo comprimido, $\theta_{a,com}$, atingida no instante t .

A linha contínua da Figura 6 mostra a curva de encurvadura lateral dada pelo Eurocódigo 3. 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

onde, $M_{b,fi,t,Rd}$ de incêndio no viga $M_{fi,\theta,Rd}$ pB

onde, $\gamma_{M0} = 1.0$

onde $\gamma_{M0} = 1.0$

Fig. 6 -

Nesta fi mesma curva a 0.4, devido ao temperaturas, E deve ser realça cociente $M_{b,fi,t}$ relativo à encur

ou

5. ENCURVAI

Adoptar [10] para a enci

$$\frac{M_{b,\beta,t,Rd}}{M_{\beta,0,Rd}} \tag{4}$$

onde, $M_{b,\beta,t,Rd}$ é o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral em situação de incêndio no instante t dado pela equação (2) e o valor de cálculo do momento resistente da viga $M_{\beta,0,Rd}$ para secções da Classe 1 e 2 com temperaturas uniformes de θ_a é dado por:

$$M_{\beta,0,Rd} = k_{y,0} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,\beta}} M_{Rd} \tag{5}$$

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

$$M_{Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \tag{6}$$

onde $\gamma_{M0} = 1.0$.

em situação de sional $\bar{\lambda}_{LT,0,com}$, λ_{LT} , seja superior

(2)

em situação de

para a máxima instante t ;

dio (geralmente

e correcção.

dio, $\chi_{LT,\beta}$, deve que a esbelteza

(3)

atura máxima no

ateral dada pelo signada na figura

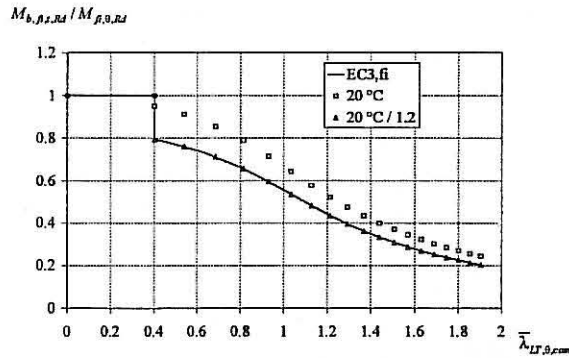


Fig. 6 – Curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3, em situação de incêndio (EC3,fi) e à temperatura ambiente (20°C).

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 $M_{b,\beta,t,Rd} / M_{\beta,0,Rd}$ marcado no eixo das ordenadas, representa o factor de redução relativo à encurvadura lateral em situação de incêndio, $\chi_{LT,\beta}$ dividido por 1.2, isto é:

$$\frac{M_{b,\beta,t,Rd}}{M_{\beta,0,Rd}} = \frac{\chi_{LT,\beta}}{1.2}, \text{ para os resultados do Eurocódigo 3, Parte 1-2} \tag{7}$$

ou

$$\frac{M_{SAFIR}}{M_{\beta,0,Rd}}, \text{ para os resultados do programa SAFIR} \tag{8}$$

5. ENCURVADURA LATERAL SEGUNDO A NOVA PROPOSTA

Adoptando para a encurvadura lateral de vigas a mesma proposta de Franssen et al [10] 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:

$$M_{b,\beta,t,Rd} = \chi_{LT,\beta} w_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,\beta}} \quad (9)$$

onde

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

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (11)$$

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

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

Comparando as equações (2) e (9) 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 (10) e (11) são exactamente as mesmas que o Eurocódigo 3, Parte 1-1 [11] define para temperatura ambiente, excepto que o limite de 0.2 para $\bar{\lambda}_{LT}$ não aparece na equação (11). Este facto altera a forma da curva de encurvadura lateral. Esta nova curva começa com um valor de $M_{b,\beta,t,Rd} / M_{\beta,Rd} = 1.0$ para $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = 0.0$, o qual vai diminuindo mesmo para pequenos valores da esbelteza adimensional, em vez de ter um patamar até um valor de $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = 0.4$ (ver Fig. 7).

A curva de encurvadura lateral varia agora com a tensão de cedência, como se pode ver na figura 7, 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. [10] 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. Foi este também o valor adoptado na nova proposta relativa à encurvadura lateral em situação de incêndio.

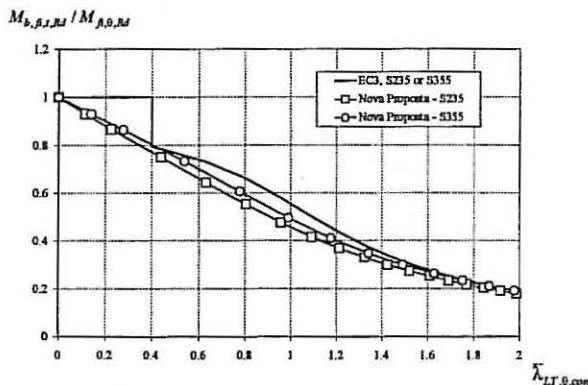


Fig. 7 – Comparação entre a curva de encurvadura lateral do Eurocódigo 3 e as correspondentes à nova proposta.

6. RESULTADO

Na figura com e sem tensão proposta, para as

massa a ser dado,

(9)

(10)

(11)

imperfeição, β é
anção apropriado

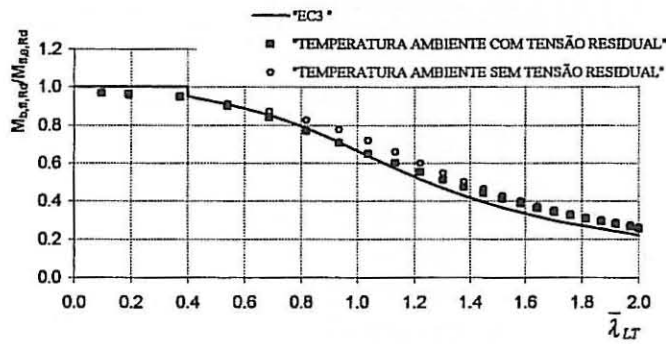
proposta não se
rocódigo 3.
go 3 Parte 1-1
não aparece na
sta nova curva
vai diminuindo
patamar até um

como se pode

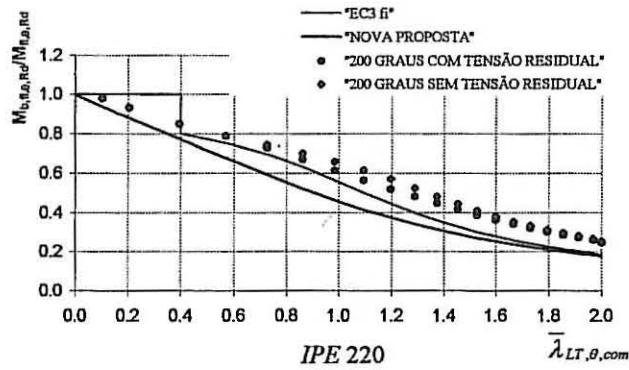
3 experimentais
] chegou a um
documentos de
este também o
ncêndio.

6. RESULTADOS NUMÉRICOS

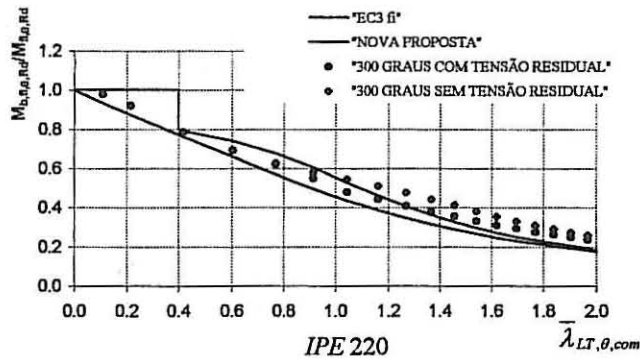
Na figura 8 comparam-se os resultados numéricos obtidos com o programa SAFIR, com e sem tensões residuais, com as curvas de encurvadura lateral do Eurocódigo 3 e da nova proposta, para as várias temperaturas analisadas.



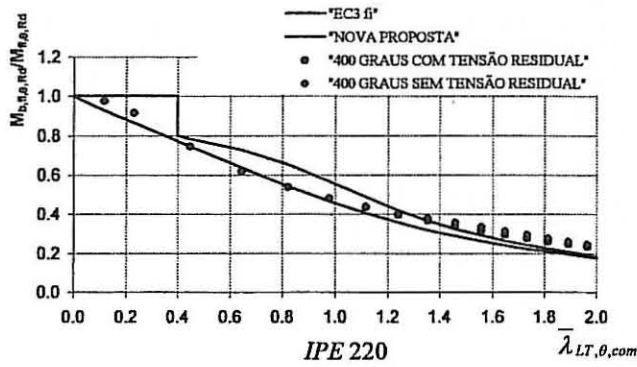
(a)



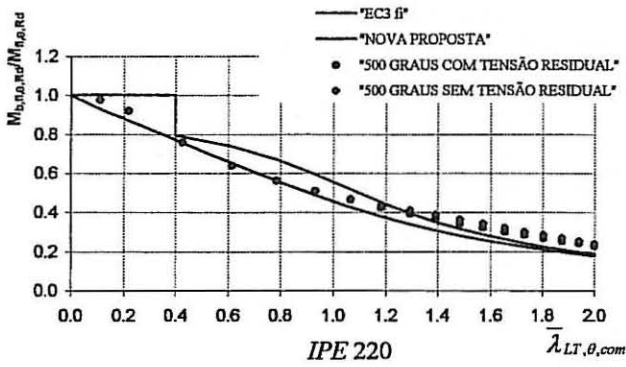
(b)



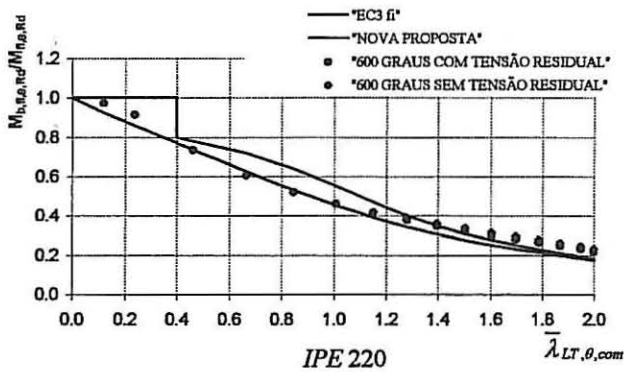
(c)



(d)



(e)



(f)

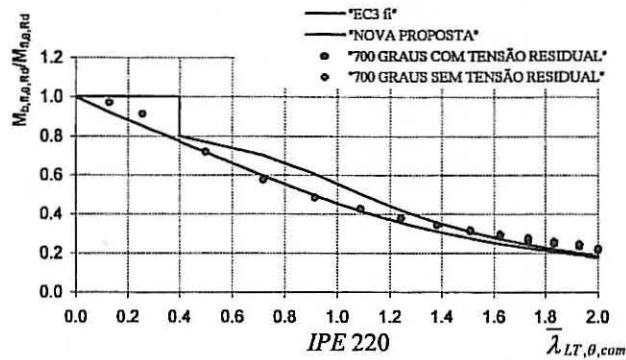
7.- CONCLUS

Confir
residuais se faz
ou seja, na reg
residuais, bem
residuais, bem
aumenta, send

Por out
e da relação t
ambiente, alter
esta curva apre
temperaturas e
de cálculo sir
comprovou n
dependem da
certa gama de
proposta actua

8.- AGRADE

Este trabalho
"Encurvadura
Fundação para



(g)

Fig. 8 – Curvas da encurvadura lateral. SAFIR, com e sem tensões residuais.

7.- CONCLUSÕES

Confirmou-se numericamente que, à temperatura ambiente, o efeito das tensões residuais se faz sentir com maior intensidade para valores intermédios da esbelteza das vigas, ou seja, na região elasto-plástica da curva de encurvadura lateral. Esta influência das tensões residuais, bem visível à temperatura ambiente, vai desaparecendo à medida que a temperatura aumenta, sendo praticamente nula para temperaturas acima dos 400 °C.

Por outro lado o facto das propriedades mecânicas do aço dependerem 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 válido à temperatura ambiente, como se comprovou numericamente, conduz, a altas temperaturas, a níveis de segurança que dependem da esbelteza das vigas, não estando os resultados do lado da segurança para uma certa gama de valores da esbelteza. Em contrapartida a nova proposta é mais segura que a proposta actual do Eurocódigo 3.

8.- AGRADECIMENTO

Este trabalho foi realizado no âmbito do projecto PRAXIS/P/ECM/14176/1998, intitulado "Encurvadura Lateral de Vigas Metálicas Sujeitas à Acção do Fogo", financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia.