



“ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS “I” DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, SUJEITAS À FLAMBAGEM LATERAL. CONTRIBUIÇÃO PARA A VALIDAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE REVISÃO DO EUROCODE 3 – PARTE 1.2.”⁽¹⁾

**“NUMERICAL ANALYSIS OF THE LATERAL – TORSIONAL BUCKLING OF
STEEL I BEAMS UNDER FIRE CONDITION”**

Ronisi Cazeli⁽²⁾
Paulo M. M. Vila Real⁽³⁾
Valdir Pignatta Siva⁽⁴⁾
P. A. G. Piloto⁽⁵⁾

Resumo

O presente trabalho documenta as análises numéricas de vigas “I” de aço sujeitas ao fenômeno da flambagem lateral, em situação de incêndio, tendo por base os resultados obtidos do programa SAFIR. O SAFIR é um programa de elementos finitos que faz a análise não-linear geométrica e do material, especialmente desenvolvido para o estudo de estruturas sujeitas à ação do fogo. Os resultados obtidos por esse programa são comparados aos resultados obtidos pelo método simplificado de dimensionamento apresentado na parte 1-2 do EUROCODE 3. Esse último modelo conduz a níveis de segurança que dependem do índice de esbelteza reduzido dos elementos estruturais, não estando os resultados do lado da segurança para uma certa gama de valores dessa esbelteza, quando comparados aos resultados numéricos. Neste estudo foi considerada toda a gama de perfis da série europeia IPE em aço S235, para uma viga simplesmente apoiada, submetida exclusivamente ao esforço do momento puro nas extremidades, considerando imperfeição geométrica do tipo senoidal e ainda tensões residuais. Com base neste estudo foi possível analisar também a validade de uma nova proposta de modelo de cálculo simples, que garante resultados mais seguros, relativamente àqueles determinados por meio do modelo apresentado na versão atual do Eurocode 3 – parte 1.2.

Palavras chave: Incêndio, Aço, Flambagem Lateral, Segurança Estrutural.

(1) - Contribuição Técnica a ser apresentada no *IV Seminário Internacional O Uso de Estruturas Metálicas na Construção Civil / I Congresso Internacional da Construção Metálica (I CICOM)* – novembro, 2001 – São Paulo, SP, Brasil.

(2) - Engenheira Civil, MSc do Dept^o Eng^a Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

(3) - Prof. Associado do Dept^o Eng^a Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

(4) - Prof. Doutor do Dept^o de Eng^a Estruturas e Fundações da Escola Politécnica/USP. São Paulo, Brasil.

(5) - Prof. Adjunto do Dept^o de Mecânica Aplicada - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal



Abstract:

In this work a model for the fire resistance of lateral-torsional buckling of steel "I" beams, based on the numerical results of the program SAFIR, a non-linear finite element programme which analyses the behaviour of structures submitted to fire, has been used. The numerical results for the lateral-torsional buckling of steel I beams have been compared to those from the simple model presented in EUROCODE 3, Part 1-2. This EUROCODE 3 simple model promotes safety levels that depend mainly on the non-dimensional slenderness of the beams. The analytical results provided by the EUROCODE 3, for intermediate values of slenderness, would now appear to be an unsafe when compared with the computed numerical results. In this study all the profiles of the European IPE series have been analysed, considering a simple supported beam of S235 steel grade, subjected to uniform moments, with a geometric imperfection of sinusoidal type. The effect of the residual stresses has also been considered. A new proposal for a simple model, different from the proposal of the EUROCODE 3, which ensures conservative results when compared with the numerical model has been validated.

Key words: Fire, Steel, Lateral- Torsional Buckling, Security.

1- INTRODUÇÃO

A ação térmica nos elementos estruturais têm sido tema de extensivas pesquisas nas últimas décadas e devido às graves conseqüências que essa ação pode causar, torna-se um dos fatores indispensáveis na verificação da segurança estrutural.

Sob condições de elevadas temperaturas, os materiais estruturais perdem resistência e rigidez, estando sujeitos ao colapso.

O fenômeno da flambagem lateral de vigas de aço em situação de incêndio é um assunto pouco conhecido, tendo em vista a complexidade que o problema alcança devido a ação térmica alterar as propriedades mecânicas do material.

Dentre as normas de projeto desenvolvidas para o dimensionamento dos elementos estruturais de aço em situação de incêndio, a norma européia, (EUROCODE 3 – parte 1.2 1995), apresenta um método simplificado de dimensionamento à flambagem lateral que depende do índice de esbelteza reduzido do elemento estrutural, admitindo também que a temperatura possa ser considerada constante em toda a seção transversal.

Métodos mais precisos para verificar a segurança dos elementos estruturais em situação de incêndio têm sido desenvolvidos com apoio em programas que se utilizam do método dos elementos finitos.

Entre vários desses programas pode-se citar o SAFIR (Franssen 1996), um programa que faz análise não-linear geométrica e do material, desenvolvido na Universidade de Liege, especialmente para o estudo de estruturas em situação de incêndio.

A validade da aplicação do SAFIR para a análise do fenômeno da flambagem lateral de vigas metálicas foi demonstrada (Vila Real & Franssen 1999, 2001), tanto para temperatura ambiente como em situação de incêndio, por meio da comparação entre os resultados numéricos fornecidos pelo SAFIR e resultados analíticos (EUROCODE 3 – parte 1.1 1992 e parte 1.2 1995).

Vila Real e Piloto desenvolveram trabalhos (Vila Real & Franssen 1999, 2001 e Piloto 2000) que validaram um novo método simplificado de dimensionamento de vigas de aço sujeitas à flambagem lateral, que apresenta resultados mais seguros que a proposta atual do EUROCODE – parte 1.2.



Essa nova metodologia de dimensionamento iniciou-se (Franssen *et al.* 1995) com o estudo da resistência ao fogo dos elementos estruturais sujeitos ao carregamento axial. Em seguida foi proposto (Vila Real & Franssen 1999, 2001), com base em estudos numéricos, um novo método simplificado de cálculo alternativo ao atualmente preconizado pelo Eurocode 3, posteriormente validado (Piloto 2000), por meio de análise experimental e análise numérica aplicadas ao estudo da flambagem lateral de vigas metálicas em situação de incêndio.

Neste trabalho apresenta-se a verificação à flambagem lateral de vigas metálicas I em situação de incêndio, comparando os resultados numéricos do SAFIR aos resultados analíticos do EUROCODE 3 – parte 1.2 e da “nova proposta”, para toda a gama de perfis da série europeia IPE em aço S235.

O modelo estudado foi uma viga simplesmente apoiada, com vínculos de garfo e seção transversal duplamente simétrica, sujeita a flexão simples com momento fletor constante aplicado nas extremidades, conforme figura 1, para temperaturas consideradas uniformes em toda a seção transversal da viga, compreendidas entre 200°C e 800°C.

A cada temperatura imposta no SAFIR, foram aplicados incrementos de carga até se chegar ao valor do momento resistente máximo à flambagem lateral, correspondente ao colapso das vigas.

Considerou-se também que a viga tem uma imperfeição geométrica do tipo senoidal (Vila Real & Franssen 1999, 2001; Piloto & Vila Real 2000; Piloto 2000) e as tensões residuais foram assumidas conforme as prescrições do ECCS (ECCS).

Os resultados apresentados neste trabalho poderão colaborar com outros estudos sobre estruturas de aço em situação de incêndio que estão sendo desenvolvidos no Brasil (Silva, 1997 e 2001).

2- DETERMINAÇÃO DO MOMENTO RESISTENTE À FLAMBAGEM LATERAL DE VIGAS “I” DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, SEGUNDO O EUROCODE

Para a determinação do valor do momento fletor resistente de vigas I de aço, sujeitas à flambagem lateral, em situação de incêndio, a parte 1.2 do EUROCODE 3 apresenta um método simplificado que consiste, inicialmente, em determinar o momento crítico elástico da viga com base na teoria da estabilidade.

No caso de uma viga simplesmente apoiada, com vínculos de garfo e seção transversal duplamente simétrica, sujeita a flexão simples com momento fletor constante nas extremidades, conforme figura 1, obtém-se o momento crítico de flambagem elástica pela exp. 1.

$$M_{cr} = \left(\frac{\pi^2 E I_y}{l^2} \right) \sqrt{\frac{J_w}{I_y} + \frac{l^2 G J_t}{\pi^2 E I_y}} \quad (1)$$

onde M_{cr} = momento crítico elástico associado à flambagem lateral; E = módulo de elasticidade longitudinal; G = módulo de elasticidade transversal; I_y = momento de inércia em relação ao eixo y ; J_t = momento de inércia à torção; J_w = constante de empenamento da seção; l = comprimento da viga.

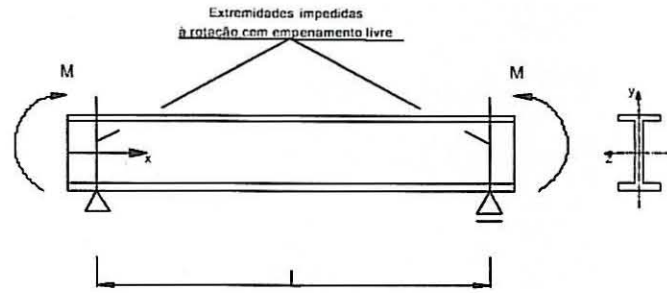


Figura 1 - Viga simplesmente apoiada com momentos aplicados nas extremidades. O valor de cálculo do momento resistente em situação de incêndio, deve ser calculado em função do índice de esbelteza reduzido do elemento em situação de incêndio ($\lambda_{LT, \theta_{com}}$), conforme exp. 2.

$$M_{b,fi, \theta_{Rd}} = M_{pl,fi, \theta, Rd} = W_{pl,y} k_{y, \theta, com} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{para } \lambda_{LT, \theta_{com}} \leq 0,4 \quad (2)$$

$$M_{b,fi, \theta, Rd} = \frac{\chi_{LT, fi}}{1,2} W_{pl,y} k_{y, \theta, com} f_y \frac{1}{\gamma_{M, fi}} \quad \text{para } \lambda_{LT, \theta_{com}} > 0,4$$

onde $M_{b,fi, \theta_{Rd}}$ = valor de cálculo do momento resistente em situação de incêndio; $M_{pl,fi, \theta_{Rd}}$ = momento de plastificação da seção em situação de incêndio; $W_{pl,y}$ = módulo de resistência plástica da seção transversal; $\chi_{LT, fi}$ = fator de redução associado à flambagem lateral em situação de incêndio determinado pela exp. 3; f_y = resistência ao escoamento do material; $\gamma_{M, fi}$ = coeficiente parcial de segurança da resistência do aço, que, em situação de incêndio, é considerado 1; γ_{M0} = coeficiente parcial de segurança de resistência, que em situação de incêndio pode ser considerado 1.

A constante 1,2 é um valor empírico utilizado como um fator de correção para representar um conjunto de efeitos.

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

sendo:

$$\phi_{LT, \theta, com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT, \theta, com} - 0,2) + (\bar{\lambda}_{LT, \theta, com})^2 \right] \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_{LT, \theta, com} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y, \theta, com}}{k_{E, \theta, com}}} \quad (5)$$

onde α_{LT} = fator de imperfeição geométrica; $\bar{\lambda}_{LT, \theta, com}$ = índice de esbelteza reduzido em situação de incêndio; $\bar{\lambda}_{LT}$ = índice de esbelteza reduzido à temperatura ambiente, determinado conforme a exp.6; $k_{y, \theta, com}$ e $k_{E, \theta, com}$ = coeficientes de redução da resistência ao escoamento (f_y) e do módulo de elasticidade longitudinal (E), à temperatura da mesa de compressão $\theta_{a, com}$, atingida no instante t.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{\lambda_{LT}}{\lambda_1} \quad (6)$$

sendo:

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\pi^2 E \frac{W_{pl,y}}{M_{cr}}} \quad (7)$$



$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (8)$$

onde M_{cr} Momento crítico elástico à flambagem lateral. Para viga simplesmente apoiada, com vínculos de garfo e seção transversal duplamente simétrica, sujeita a flexão simples com momento fletor constante nas extremidades, deve ser determinado conforme a exp. 1. Para diferentes tipos de carregamentos, vínculos e seções, determinado de acordo com o anexo F da parte 1.1 do EUROCODE 3.

Dividindo-se o valor do momento resistente de cálculo pelo valor de cálculo do momento de plastificação da seção, encontra-se a curva apresentada na figura 2, que segundo o EUROCODE 3 – parte 1.2 é válida para qualquer temperatura superior a 20 °C.

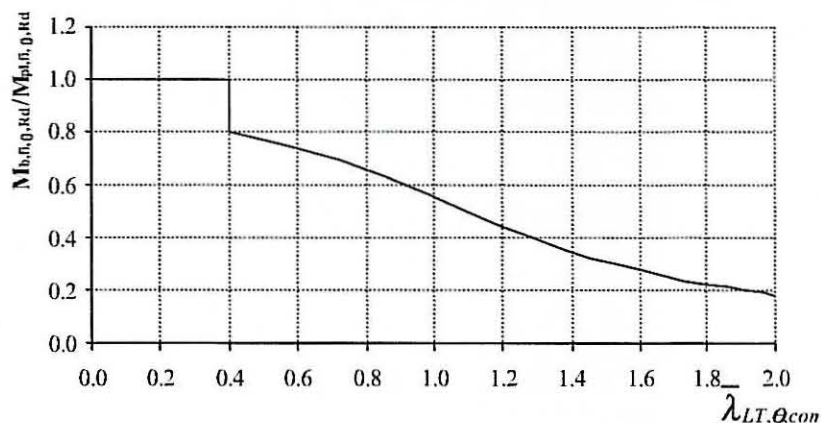


Figura 2 - Curva para determinação do valor de cálculo do momento fletor resistente em situação de incêndio, segundo a parte 1.2 do EUROCODE 3.

3- DETERMINAÇÃO DO MOMENTO RESISTENTE À FLAMBAGEM LATERAL DE VIGAS "I" DE AÇO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO, PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS, SEGUNDO O PROGRAMA SAFIR

A análise de vigas de aço sujeitas à flambagem lateral, segundo o programa SAFIR, inicia-se por definir-se: seção transversal, malha de elementos finitos, número de faces expostas ao fogo e curva temperatura-tempo do incêndio.

Para uma viga simplesmente apoiada e carregamento uniforme, conforme figura 1, considerou-se toda a gama de perfis da série européia IPE em aço S235 ($f_y = 235$ MPa), com seção transversal discretizada por malha de 108 elementos, conforme figura 3, com integração de dois pontos de Gauss.



Figura 3 - Malha da seção transversal para a análise estrutural segundo o SAFIR.

Assim com o objetivo de comparar os resultados numéricos obtidos do programa SAFIR aos analíticos obtidos da parte 1.2 do EUROCODE 3, impôs-se às vigas, temperaturas uniformes em toda a seção transversal, compreendidas entre 200°C e 800°C, com incrementos de 100°C, para vários comprimentos da viga.

Tendo em vista, na prática, a presença de imperfeições geométricas e tensões residuais, foi incorporado ao programa esses dois efeitos.

Para a imperfeição geométrica utilizou-se a curva senoidal (Vila Real & Franssen 1999, 2001, Piloto & Vila Real 2000, Piloto 2000) apresentada na exp. 9.

$$y(x) = \frac{l}{1000} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (9)$$

onde x = coordenada do eixo da viga; l = comprimento da viga.

Para tensão residual (σ_r), foi considerado o valor da resistência ao escoamento (f_y) multiplicado por coeficientes redutores, cuja distribuição é indicada na figura 4 (ECCS).

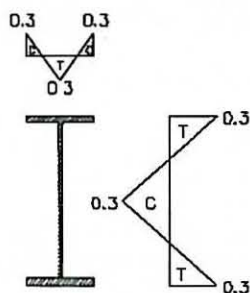


Figura 4 - Distribuição normalizada (σ_r/f_y) das tensões residuais em perfis laminados.

Na figura 5 pode ser visto o resultado da análise numérica efetuada, para o perfil IPE 220, sujeito a temperaturas compreendidas entre 200°C e 800°C, em que M_{SAFIR} é o máximo momento resistente suportado pela viga calculado via SAFIR, estando representado em ordenadas o quociente:

$$\frac{M_{SAFIR}}{M_{pl,f_i,\theta_{Rd}}} \quad (10)$$

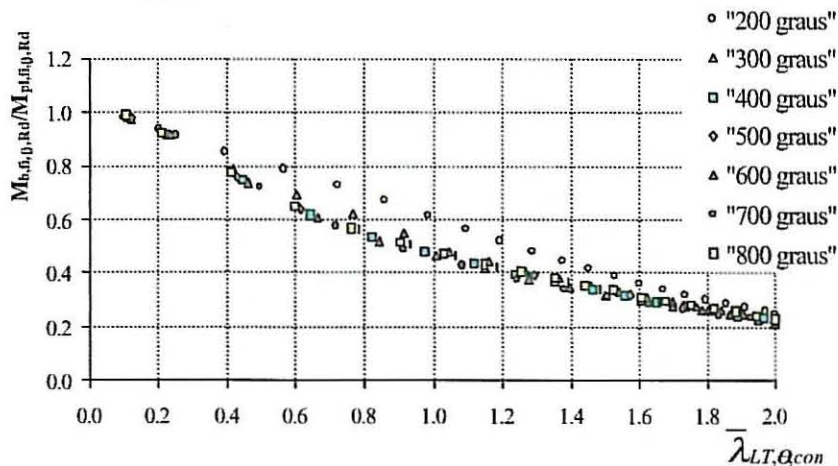


Figura 5 - Valores de $M_{SAFIR}/M_{pl,f_i,\theta_{Rd}}$, em função da esbeltez reduzida, para temperaturas compreendidas entre 200°C e 800°C, para o perfil IPE 220.



4- NOVA PROPOSTA

Este trabalho tem o objetivo de validar uma "nova proposta" para a determinação do momento fletor resistente em situação de incêndio, de forma mais realística do que aquela recomendada pelo EUROCODE 3 parte 1.2

Para essa nova metodologia (Vila Real & Franssen 1999, 2001), o valor de cálculo do momento resistente à flambagem lateral em situação de incêndio é dado por:

$$M_{b,fi, Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (11)$$

Pode-se notar que a exp. 11 é a similar à exp. 2 preconizada pelo EUROCODE 3 – parte 1.2, sem, no entanto, incluir a constante empírica 1,2.

O fator de redução associado à flambagem lateral $\chi_{LT,fi}$ bem como o índice de esbelteza reduzido em situação de incêndio $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$, são calculados da mesma maneira que as equações (3),e (5), sendo o valor de $\phi_{LT,\theta,com}$ na "nova proposta" dado por:

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2 \right] \quad (12)$$

Nesta "nova proposta", no entanto, o fator de imperfeição (α) será um valor considerado em função de um fator de severidade (β), que deverá ser escolhido de forma a garantir um nível de segurança apropriado. A expressão de (α) é dada pela exp. 13.

$$\alpha = \beta \epsilon \quad (13)$$

Sendo (ϵ) calculado conforme exp. 14.

$$\epsilon = \sqrt{(235 / f_y)} \quad (14)$$

A consideração da imperfeição geométrica, por meio do fator de severidade (β), altera a forma da curva de determinação do momento resistente. Essa nova curva começa com $(M_{b,fi, Rd} / M_{pl,fi, Rd})$ igual à unidade para valores de $\bar{\lambda}_{LT} = 0$ e vai diminuindo progressivamente, sem o patamar entre $\bar{\lambda}_{LT} = 0$ e $\bar{\lambda}_{LT} = 0,4$. Esse efeito pode ser visto na figura 6, onde se representa a curva para determinação do valor de cálculo do momento resistente à flambagem lateral em situação de incêndio correspondente à "nova proposta", obtida com $\beta = 0.65$, que é o valor proposto por Vila Real (Vila Real & Franssen 1999, 2001) e mais tarde confirmado por Piloto (Piloto 2000).

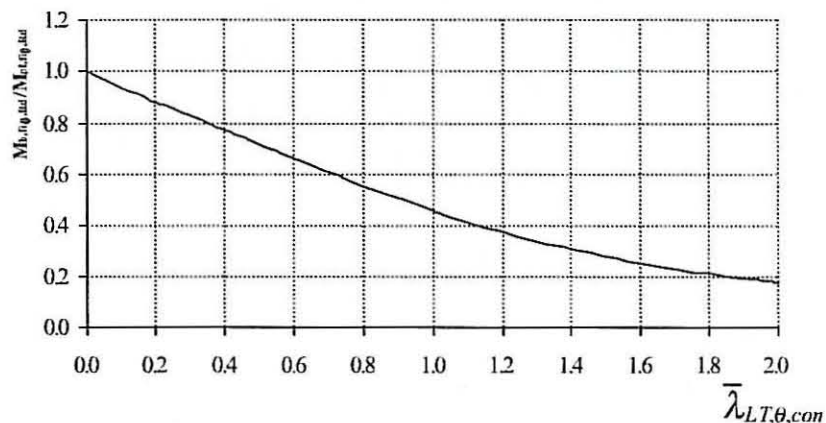
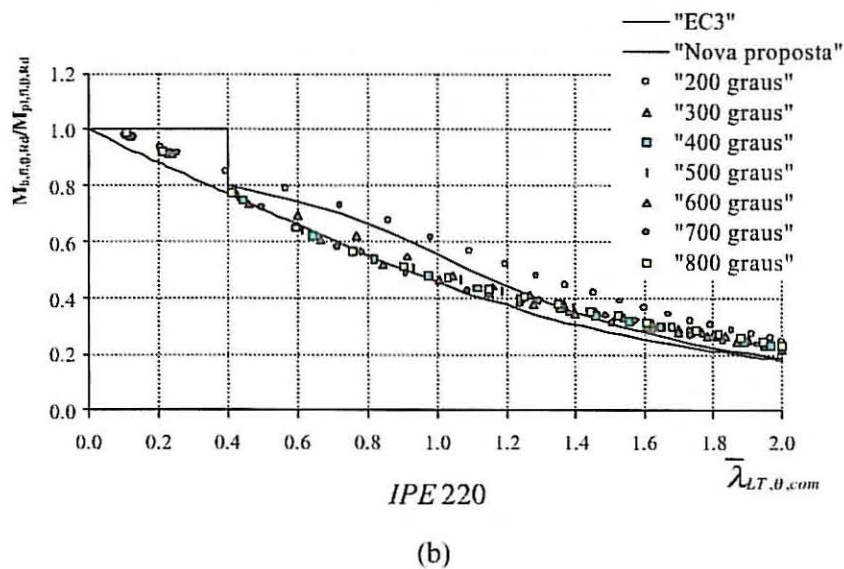
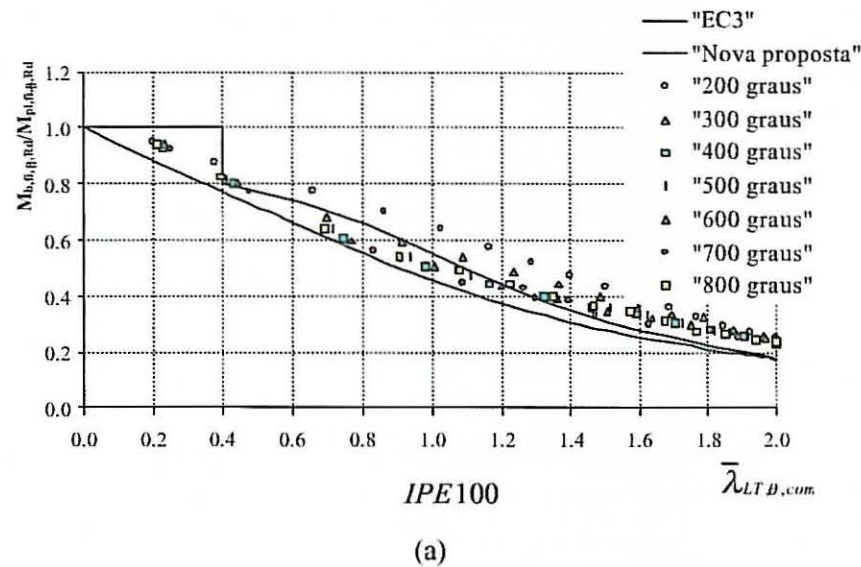


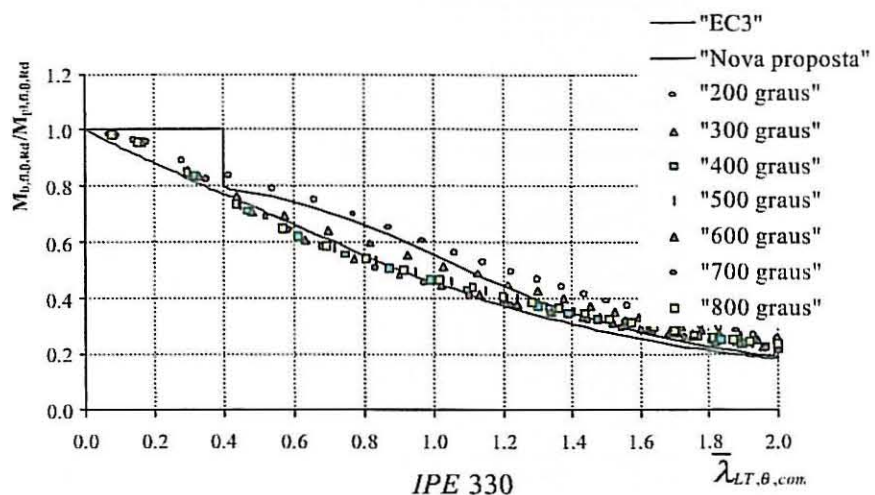


Figura 6 - Curva para a determinação do valor de cálculo do momento resistente em situação de incêndio, conforme a "nova proposta".

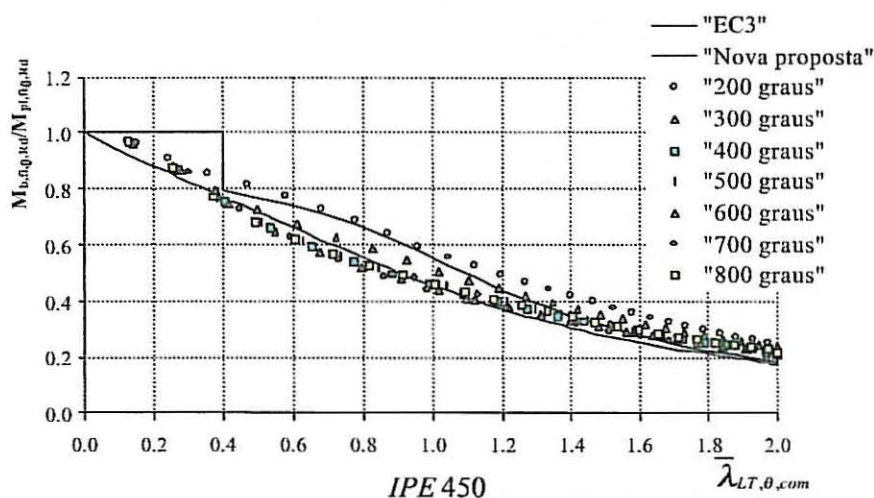
5.- RESULTADOS

Dada a limitação de espaço a figura 7(a, b, c, d) apresenta os resultados obtidos apenas para alguns dos perfis utilizados para o cálculo do momento fletor resistente de vigas I de aço, sujeitas à flambagem lateral, em situação de incêndio, de acordo com as três metodologias citadas: EUROCODE 3 – parte 1.2, SAFIR e "nova proposta", para toda a gama de perfis da série europeia IPE em aço S235 ($f_y = 235MPa$), submetidos a temperaturas compreendidas entre 200°C a 800°C.





(c)



(d)

Figura 7 - Resultados obtidos do cálculo do momento fletor resistente de vigas I de aço, sujeitas à flambagem lateral, em situação de incêndio, de acordo com o EUROCODE 3 – parte 1.2, o programa SAFIR e “nova proposta”.

Pode-se notar que para perfis mais pesados e temperatura mais altas, menores serão os valores do momento resistente relativo obtidos a partir do SAFIR

Nota-se também que a curva preconizada pelo EUROCODE 3 – parte 1.2 apresenta um nível de segurança inferior, em relação aos resultados obtidos por intermédio do SAFIR, principalmente para pequenas esbeltezas. Os valores obtidos pela “nova proposta” respeitam com maior precisão os determinados a partir do SAFIR.

6.- CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho os resultados de análise numérica de vigas “I” de aço sujeitas a flambagem lateral, em situação de incêndio, tendo por base o programa SAFIR.



A capacidade desse código foi comparada com os resultados analíticos obtidos segundo um método simplificado de dimensionamento apresentado pela norma europeia, EUROCODE 3 – parte 1.2. A metodologia de cálculo é praticamente a mesma recomendada para temperatura ambiente, exceto que, a altas temperaturas, a resistência ao escoamento (f_y) e o módulo de elasticidade longitudinal (E), são reduzidos por meio dos fatores ($k_{y,\theta}$) e ($k_{E,\theta}$), respectivamente.

Comparando os resultados dessas duas análises, pode-se notar que a curva preconizada pelo EUROCODE 3 – parte 1.2 apresenta um nível de segurança inferior, em relação aos resultados obtidos por intermédio do SAFIR, principalmente para pequenas esbeltezes.

Em alternativa à proposta atual do Eurocode 3 – parte 1.2, e dada a insegurança que esta apresenta, está em consideração uma “nova proposta”, a qual também aqui se analisou, tendo-se verificado no entanto que apesar de mais segura continua a apresentar resultados acima dos valores obtidos numericamente. Teria sido possível ajustar a curva da “nova proposta” por meio do fator de severidade (β) de maneira a que os valores numéricos se situassem acima daquela curva. No entanto, dado que os resultados numéricos se obtiveram considerando o efeito conjunto da imperfeição geométrica e das tensões residuais atuando em simultâneo com os seus valores máximos, é de prever que na realidade esta simultaneidade não ocorra, situando-se a resistência à flambagem lateral obtida numericamente mais próxima da curva da “nova proposta” aqui analisada. Assim sugere-se, para a “nova proposta”, a manutenção do valor de 0,65 para o fator de severidade (β) proposto (Vila Real & Franssen 1999, 2001).

7.- AGRADECIMENTO

Trabalho financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, de Portugal, no âmbito de um projecto PRAXIS XXI intitulado “*Encurvadura Lateral de Vigas Metálicas em Situação de Incêndio*”, no qual é consultor o Prof. Jean-Marc Franssen da Universidade de Liège.

8. – REFERÊNCIAS

- ECCS - EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEEL WORK 1984. **Technical Committee 8 – Structural Stability. Technical Working Group 8.2 – System. Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames with Rigid Joints.** First Edition.
- EUROPEAN STANDARD EUROCODE. 1992. ENV 1993-1-1. **EUROCODE 3: Design of Steel Structures - Part 1-1: General Rules.** CEN. Brussels.
- FRANSSEN, J. M.; BAPTISTE J.; CAJOT, L. G. 1995. **A Simple Model for Fire Resistance of Axially-loaded Members According to EUROCODE 3.** Journal Construct. Steel Research, vol.35, p. 49-69.
- FRANSSEN, J. M. 1996. **PROGRAM SAFIR, Ver. 1.3, User's Manual.** Université de Liège, Institut du Genie Civil, Service. Liège.
- PILOTO, P. A.G.; VILA REAL, P. M. M. 2000. **Modelação pelo MEF da Encurvadura Lateral de Vigas I Metálicas Sujeitas a Elevadas Temperaturas.** VI Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional. Universidade de Aveiro. Anais, vol. 2, p. 1121-1130.
- PILOTO; P. A. G. 2000. **Análise Experimental e Numérica do Comportamento de Estruturas Metálicas Sujeitas à Acção do Fogo.** Tese - Doutorado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SILVA, V. P. 1997. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio.** EPUSP. Tese - Doutorado em Engenharia de Estruturas – PEF/EPUSP



SILVA, V. P. 2001. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**". São Paulo. Zigurate Editora.

VILA REAL, P. M. M., FRANSSSEN, J. M. 1999. **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 Charpents of the University of Liege.

VILA REAL, P. M. M.; FRANSSSEN, J. M. 1999. **Lateral Buckling of Steel I Beams under Fire Conditions – Comparison between the EUROCODE 3 and the SAFIR**. Internal report, nº 99/02. Institute of Civil Engineering – Service Ponts et Charpents of the University of Liege.

VILA REAL, P. M. M.; FRANSSSEN, J. M. 2001. **Numerical Modelling of Lateral-Torsional Buckling of Steel I-Beams under Fire Conditions. Comparison with Eurocode 3**", Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 11.