

COMPORTAMENTO DE VIGAS – COLUNA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: UMA NOVA PROPOSTA DE CÁLCULO SIMPLES ALTERNATIVA AO EC3

Nuno Lopes¹, Paulo Vila Real², Luís Simões da Silva³, Paulo Piloto⁴

RESUMO

A parte 1-1 do Eurocódigo 3 foi recentemente alterada relativamente à verificação da segurança de vigas-coluna e de vigas sujeitas a encurvadura lateral.

A fim de se estudar a possibilidade de se ter, na parte 1-1 e na parte 1-2 daquele Eurocódigo, a mesma abordagem para a verificação de vigas-coluna, foi realizado pelos autores, num artigo anterior, um estudo numérico, que concluiu que a nova abordagem (parte 1-1) pode ser usada em caso de incêndio.

Foi também proposto, pelos autores noutro artigo recente, uma melhoria da análise da encurvadura lateral de vigas em situação de incêndio, usando uma abordagem similar à utilizada na parte 1-1 do Eurocódigo 3.

No presente artigo foi usada a nova abordagem para a encurvadura lateral, com as fórmulas de verificação da segurança de vigas-coluna a temperaturas elevadas baseadas na prEN 1993-1-1 bem como com as fórmulas da prEN1993-1-2. Em ambos os casos os resultados melhoraram significativamente relativamente aos resultados numéricos.

1. INTRODUÇÃO

A prEN 1993-1-1 (2003)¹ introduziu diversas alterações nas fórmulas de verificação da segurança de vigas-coluna e de vigas com encurvadura lateral à temperatura ambiente. Estas modificações ocorreram durante a conversão do Eurocódigo 3 de pré-norma (ENV) para norma definitiva (EN).

São propostas na prEN 1993-1-1 (2003)¹ duas novas formulações para a verificação da segurança de vigas-coluna à temperatura ambiente, que são o resultado do trabalho extensivo realizado por dois grupos que seguiram aproximações diferentes, a saber, um grupo Franco-

¹ Monitor, Universidade de Aveiro, Dep. Engenharia Civil, 3810 Aveiro.

² Prof. Catedrático, Universidade de Aveiro, Dep. Engenharia Civil, 3810 Aveiro.

³ Prof. Associado c/ Agregação, Universidade de Coimbra, Dep. Engenharia Civil, 3030 Coimbra.

⁴ Prof. Coordenador, Instituto Politécnico de Bragança, Dep. Mecânica Aplicada, 5300 Bragança

Belga e um Austro-Alemão a que correspondem respectivamente o método 1 e o método 2 preconizados naquele eurocódigo.

Em situação de incêndio, na prEN 1993-1-2 (2002)², as fórmulas propostas para a verificação da segurança de vigas-colunas não mudaram e são baseadas ainda na ENV 1993-1-1 (1992)³.

A fim de se estudar a possibilidade de ter, na parte 1-1 e na parte 1-2 do Eurocódigo 3, a mesma abordagem para vigas-coluna, foi realizado um estudo numérico que concluiu que é possível usar as fórmulas da parte 1-1, desde que alguns factores sejam modificados para considerar a influência das temperaturas⁴.

Foram introduzidas na prEN 1993-1-1 (2003)¹, significativas alterações na avaliação da resistência da encurvadura lateral de vigas à temperatura ambiente, que conduziram a resultados que são seguros mas menos conservativos do que aqueles obtidos pela abordagem utilizada na ENV 1993-1-1 (1992)³, no caso de diagramas de momentos não uniformes.

Resultados da modelação numérica da encurvadura lateral de vigas de aço sujeitas a altas temperaturas, mostraram⁵ que a curva da prEN 1993-1-2 (2002)² é demasiado conservativa para diagramas de momento diferentes do diagrama de momento uniforme.

Seguindo a mesma abordagem utilizada na avaliação da segurança da encurvadura lateral à temperatura ambiente, Vila Real et al⁵ apresentou uma proposta alternativa para secções laminadas ou secções soldadas equivalentes em situação de incêndio, que teve em consideração a influência do tipo de carregamento, conduzindo a uma melhor aproximação ao comportamento real e mantendo a segurança.

O objectivo do presente artigo é avaliar as propostas feitas por Vila Real et al⁴ para a verificação da segurança de vigas-coluna sujeitas a encurvadura lateral em situação de incêndio, mas usando a nova proposta para encurvadura lateral de vigas sujeitas a altas temperaturas⁵. Esta nova proposta será também usada com as fórmulas da verificação da segurança de vigas-coluna da prEN 1993-1-2 (2002).

Usando o código de elementos finitos SAFIR⁶, desenvolvido na Universidade de Liège para estudo de estruturas em situação de incêndio, comparam-se os resultados numéricos com os resultados obtidos através das fórmulas de interacção da parte 1-2 de Eurocódigo 3² (aqui denominados por “EC3 parte 1-2 (2002)” quando a nova proposta para encurvadura lateral⁵ não é considerada e “EC3 parte 1-2 (2002) / f” quando esta nova proposta é considerada) e com a adaptação a altas temperaturas do método 1 e do método 2 da prEN 1993-1-1 (2003)⁴ aqui denominados por “EC3 método 1, f_i / f ” e “EC3 método 2, f_i / f ” ou “EC3 método 1, f_i ” e “EC3 método 2, f_i ”, se a nova proposta para encurvadura lateral⁵ for, respectivamente, considerada ou não

2. CASO ESTUDADO

Foi usada uma viga-coluna simplesmente apoiada com apoios em forquilha, como se mostra na figura 1. Foram testados dois tipos de diagramas de momento, correspondentes a $\psi=0$ e a $\psi=-1$ (ver figura 1 e 2).

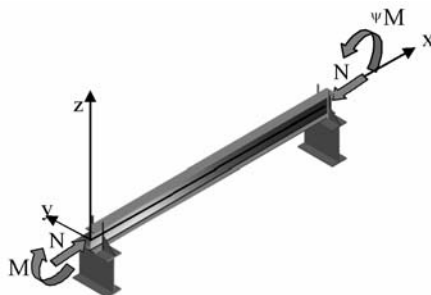


Fig. 1 - Viga-coluna simplesmente apoiada com flexão não uniforme.

O caso $\psi=1$ não foi estudado neste trabalho, pois nesta situação a formulação proposta para a avaliação da resistência à encurvadura lateral de vigas metálicas permanece igual à proposta existente na prEN 1993-1-2. Por outro lado o estudo paramétrico de vigas-coluna para $\psi = 1$ foi já efectuado por Vila Real et al⁴.



Fig. 2 - Diagramas de momentos estudados.

Foi usado um IPE 220 em aço S235 e foram utilizadas temperaturas uniformes na secção transversal, para que se pudesse comparar os resultados numéricos com o Eurocódigo. Neste trabalho a temperatura usada foi de 600 °C, pois representa adequadamente a maior parte das situações práticas.

Foi considerada uma imperfeição geométrica dada pela expressão

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

e uma rotação inicial com um máximo de $l/1000$ rad a meio vão.

Foram também adoptadas tensões residuais constantes ao longo das espessuras da alma e do banzo com uma distribuição triangular como se mostra na Figura 3, com um máximo de 0.3×235 MPa, para o aço S235⁷.

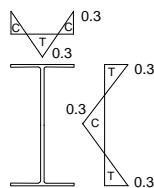


Fig. 3 - Tensões Residuais: C – compressão; T – tracção

3. NOVA PROPOSTA DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À ENCURVADURA LATERAL DE VIGAS, ALTERNATIVA À PROPOSTA DA prEN 1993-1-2

De acordo com a prEN 1993-1-2², o momento resistente à encurvadura lateral de secções das classes 1 ou 2 é dado por:

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

onde $\chi_{LT,fi}$ é dado por

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

com

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

em que

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

$\gamma_{M,fi}$ é o coeficiente parcial de segurança para a situação de incêndio ($\gamma_{M,fi} = 1.0$).

A esbelteza adimensional $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ (ou $\bar{\lambda}_{LT,fi}$, se o campo de temperaturas na secção transversal for uniforme) é dado por

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

onde

$k_{E,\theta,com}$ é o factor de redução para o módulo de elasticidade para a temperatura máxima atingida no instante t .

O factor de imperfeição α é função da classe do aço e é dado por:

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y} \quad (6)$$

Para $\psi = 0$ e $\psi = -1$, esta formulação, conduz a resultados demasiado conservativos quando comparados com os resultados numéricos para o caso de flexão não uniforme. Para evitar estes resultados demasiado conservativos, Vila Real et al⁵ fez uma nova proposta que adopta um factor de redução para a encurvadura lateral modificado, $\chi_{LT,fi,mod}$, dado por

$$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \quad \text{but} \quad \chi_{LT,fi,mod} \leq 1 \quad (7)$$

4. FÓRMULAS DE INTERACÇÃO PARA VIGAS-COLUNA SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

4.1 Fórmulas de Interação Propostas pela prEN 1993-1-2

Em situação de incêndio, de acordo com a nova versão da parte 1-2 do Eurocódigo 3² as fórmulas de interacção para vigas-coluna são:

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

onde

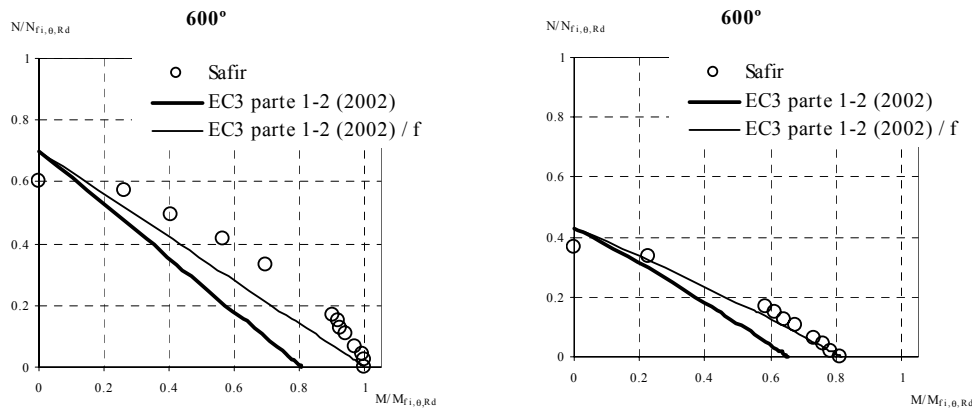
$$K_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{y,0} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \quad \text{but} \quad K_{LT} \leq 1.0 \quad (10)$$

e

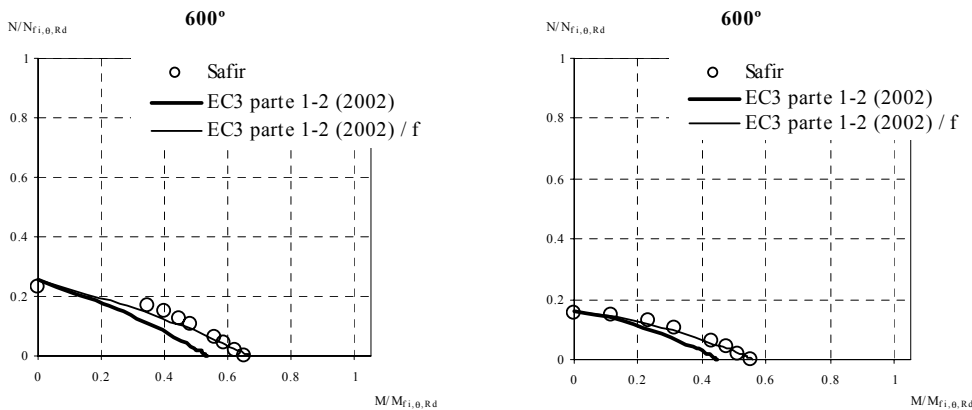
$$\mu_{LT} = 0.15 \bar{\lambda}_{z,0} \beta_{M,LT} - 0.15 \quad \text{but} \quad \mu \leq 0.9 \quad (11)$$

Sendo $\chi_{z,fi}$ o factor de redução para a encurvadura por compressão em torno do eixo dos zz , e $\chi_{LT,fi}$ o factor de redução para a encurvadura lateral, dado por (3).

Para estudar os métodos descritos, foram obtidas as curvas para cada comprimento da viga-coluna e para cada um dos dois tipos de diagrama de momentos ($\psi=0$ e $\psi=-1$), ilustrados na figura 2. Através da fórmula de interacção (9) as curvas foram obtidas para valores crescentes da relação $N/N_{fi,0,Rd}$. A comparação dessas curvas com os resultados numéricos considerando temperatura uniforme de 600 °C encontra-se ilustrada nas figuras 4 e 5. Nestas figuras os resultados da expressão (9), baseadas na prENV 1993-1-1 (1992)³, são denominados por “EC3 parte 1-2 (2002)” se a nova proposta para encurvadura lateral não for considerada e “EC3 parte 1-2 (2002) / f” se essa nova proposta for considerada.

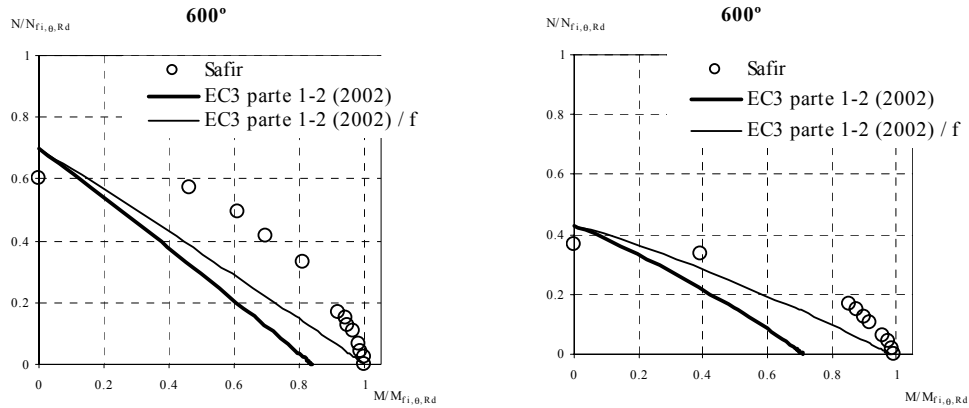


a) $L=1000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.34$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.14$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=0.53$ b) $L=2000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.62$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.29$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.06$

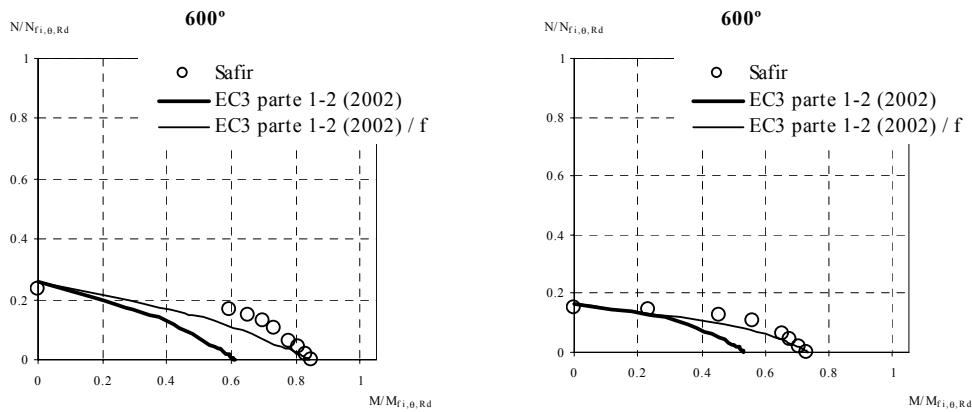


c) $L=3000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.84$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.43$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.59$ d) $L=4000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=1.02$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.58$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=2.12$

Fig. 4 - Curvas de interacção para flexão composta com compressão a 600 °C, da prEN 1993-1-2, considerando ou não a nova proposta para encurvadura lateral⁵, para $\psi=0$



a) $L=1000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.28$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.14$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=0.53$ b) $L=2000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.51$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.29$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.06$



c) $L=3000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.69$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.43$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.59$ d) $L=4000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.84$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.58$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=2.12$

Fig. 5 - Curvas de interacção para flexão composta com compressão a 600 °C, da prEN 1993-1-2, considerando ou não a nova proposta para encurvadura lateral⁵, para $\psi=-1$

4.2. Fórmulas de Interacção Propostas para Temperaturas Elevadas Baseadas na prEN 1993-1-1

Vila Real et al⁴ propôs as seguintes expressões de interacção para vigas-coluna em caso de incêndio:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} \frac{N_{fi,Rk}}{\gamma_{M,fi}}} + k_{yy,fi} \frac{M_{y,fi,Ed} + \Delta M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \frac{M_{y,fi,Rk}}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (12a)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \frac{N_{fi,Rk}}{\gamma_{M,fi}}} + k_{zy,fi} \frac{M_{y,fi,Ed} + \Delta M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \frac{M_{y,fi,Rk}}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (12b)$$

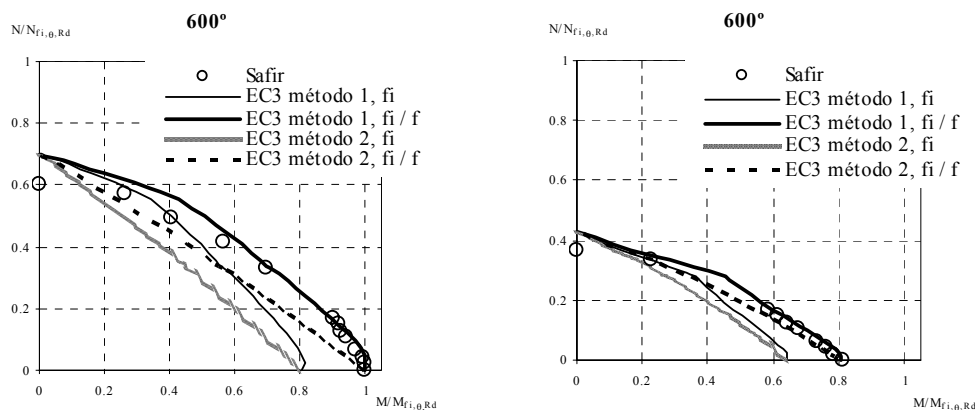
onde $\chi_{y,fi}$ e $\chi_{z,fi}$ são os factores de redução para a encurvadura por compressão em torno do eixo dos yy e do eixo dos zz respectivamente, e $\chi_{LT,fi}$ é o factor de redução para a encurvadura lateral, dado por (3). Os factores $k_{yy,fi}$ e $k_{zy,fi}$ são os factores de interacção em caso de incêndio que podem ser determinados de acordo com dois métodos (“EC3 método 1,

fi” e “EC3 método 2, fi”) descritos em Vila Real et al⁴. Se a nova proposta feita por Vila Real et al⁵ para encurvadura lateral for usada, são obtidos dois outros métodos (“EC3 método 1, fi/f” e “EC3 método 2, fi/f”).

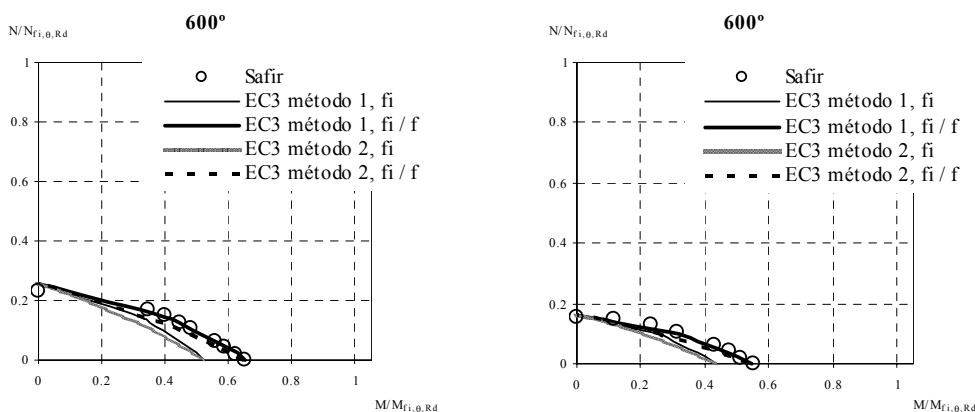
O procedimento para a determinação dos factores de interacção para “EC3 método 1, fi” é baseado no método 1 à temperatura ambiente, que se encontra descrito no Anexo A da parte 1-1 do Eurocódigo 3¹ e foi desenvolvido por um grupo de trabalho Franco-Belga⁸ combinando a teoria de encurvadura e calibrações numéricas para ter em consideração todas as diferenças entre o modelo real e o teórico.

Por sua vez o “EC3 método 2, fi” baseia-se no método 2 à temperatura ambiente, que se encontra descrito no Anexo B da parte 1-1 do Eurocódigo 3¹ e resulta de uma proposta Austro-Alemã⁹ que tem como principal objectivo simplificar a verificação da segurança de vigas-coluna. Todos os factores de interacção foram obtidos por calibrações numéricas. Estes factores não têm significado físico, mas as expressões simples reduzem a possibilidade de erro.

As Figuras 6 e 7 ilustram a influência da consideração ou não da nova proposta para encurvadura lateral⁵ nos métodos 1 e 2 adaptados a altas temperaturas, para $\psi = 0$ e $\psi = -1$ respectivamente.

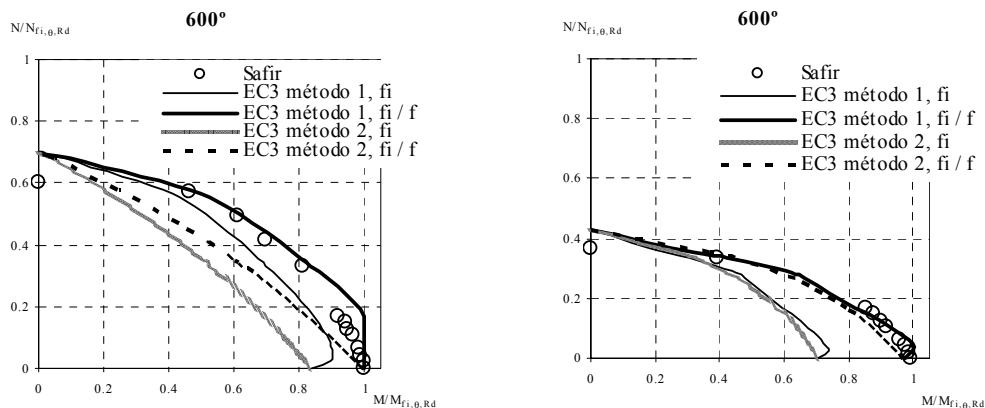


a) $L=1000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.34$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.14$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=0.53$ b) $L=2000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.62$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.29$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.06$

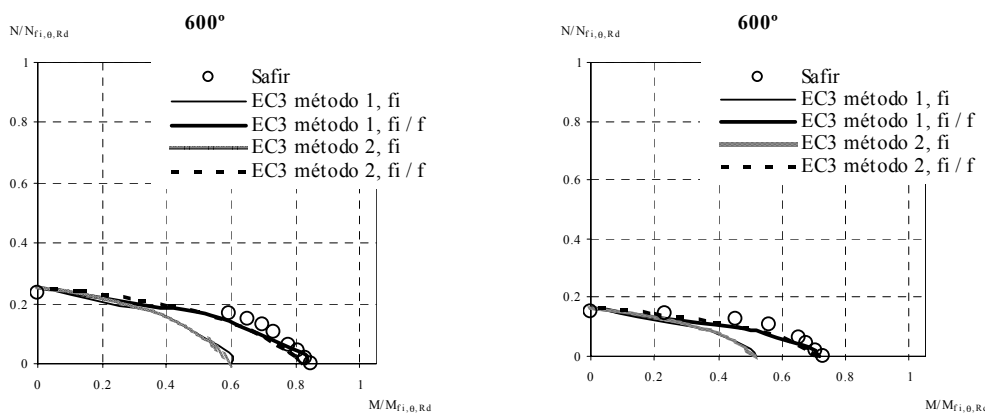


c) $L=3000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.84$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.43$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.59$ d) $L=4000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=1.02$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.58$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=2.12$

Fig. 6 - Curvas de interacção para flexão composta a 600 °C, adaptadas da prEN 1993-1-1, considerando ou não a nova proposta para encurvadura lateral⁵, para $\psi = 0$



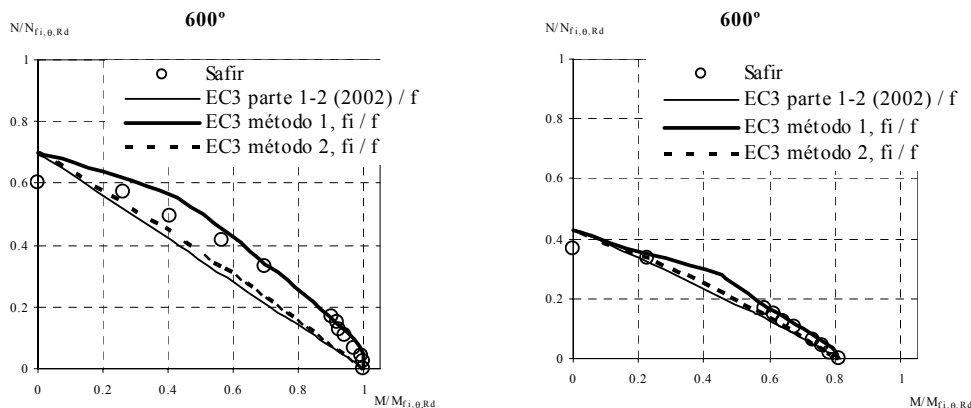
a) $L=1000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.28$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.14$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=0.53$ b) $L=2000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.51$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.29$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.06$



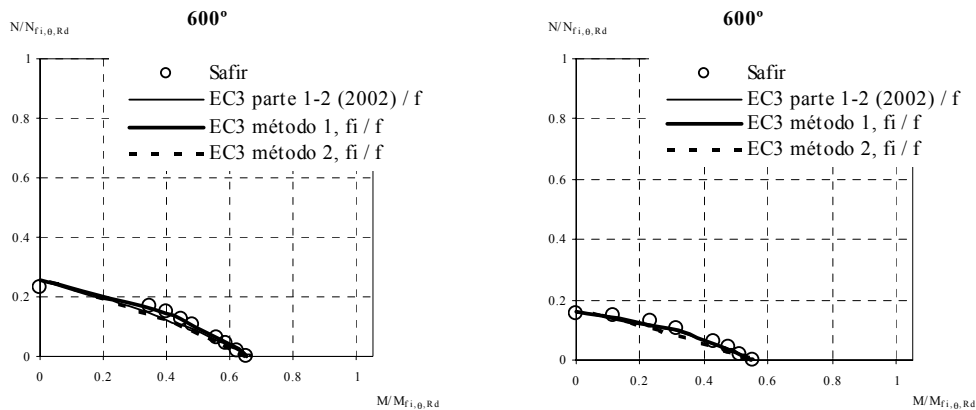
c) $L=3000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.69$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.43$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.59$ d) $L=4000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.84$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.58$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=2.12$

Fig. 7 - Curvas de interação para flexão composta a 600 °C, adaptadas da prEN 1993-1-1, considerando ou não a nova proposta para encurvadura lateral⁵, para $\psi=-1$.

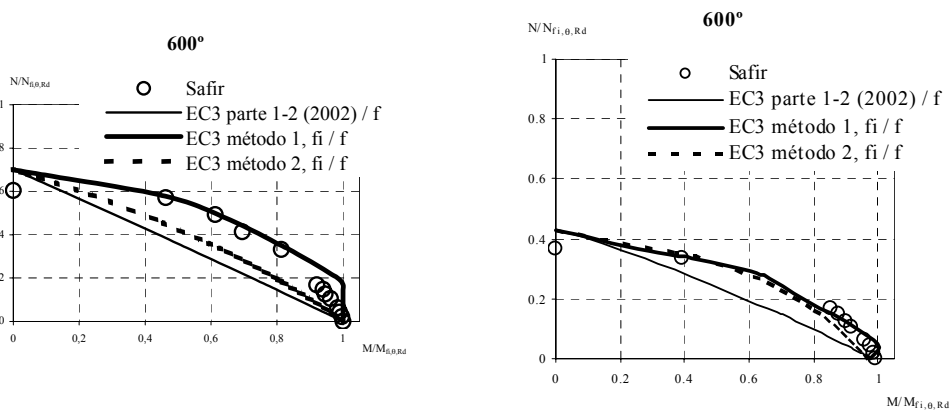
Por fim as Figuras 8 e 9, ilustram o comportamento dos três métodos aqui estudados, considerando a nova proposta para encurvadura lateral de vigas⁵. Como se pode constatar as três propostas apresentam resultados muito semelhantes à medida que o comprimento das vigas-coluna aumenta e com boa concordância com os resultados numéricos.



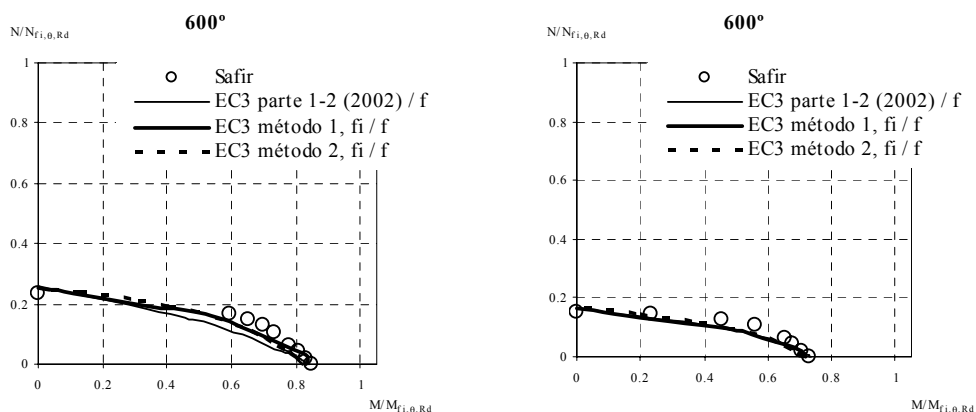
a) $L=1000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.34$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.14$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=0.53$ b) $L=2000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.62$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.29$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.06$



c) $L=3000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.84$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.43$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.59$ d) $L=4000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=1.02$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.58$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=2.12$
 Fig. 8 - Curvas de interacção para flexão composta com compressão a 600 °C, considerando a nova proposta para encurvadura lateral⁵, para $\psi=0$



a) $L=1000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.28$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.14$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=0.53$ b) $L=2000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.51$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.29$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.06$



c) $L=3000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.69$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.43$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=1.59$ d) $L=4000\text{mm}$; $\bar{\lambda}_{LT,fi}=0.84$; $\bar{\lambda}_{y,fi}=0.58$; $\bar{\lambda}_{z,fi}=2.12$
 Fig. 9 - Curvas de interacção para flexão composta com compressão a 600 °C, considerando a nova proposta para encurvadura lateral⁵, para $\psi=-1$

5. CONCLUSÕES

Foi demonstrado que a proposta, para a encurvadura lateral de vigas sujeitas a temperaturas elevadas, melhora significativamente as curvas de interação para vigas-coluna em situação de incêndio.

A proposta baseada no método 1 e no método 2 da prEN 1993-1-1 é mais eficiente do que a baseada na prEN 1993-1-2.

Se os métodos 1 e 2 aqui propostos vierem a ser adoptados na parte 1-2 do Eurocódigo 3, existirá a vantagem de se usar a mesma formulação à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, como tem acontecido nas anteriores versões do Eurocódigo 3. Estes aspectos devem ser tomados em consideração numa próxima revisão do Eurocódigo 3.

O estudo apresentado neste trabalho recomenda que se venha a usar o método 1 e o método 2 em futuras versões da parte 1-2 do Eurocódigo 3.

REFERÊNCIAS

- [1] EUROCODE 3, Design of Steel Structures – “part 1-1. General rules and rules for buildings.” prEN 1993-1-1:2003, Stage 34 Draft, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, 2003.
- [2] EUROCODE 3, Design of Steel Structures – “part 1-2. General rules – Structural fire design.” Draft prEN 1993-1-2:20xx, Stage 34, European Committee for Standardisation, Brussels, Belgium, February 2002.
- [3] EUROCODE 3, Design of Steel Structures – “part 1-1. General rules and rules for buildings.” ENV 1993-1-1, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium, 1992.
- [4] Vila Real, P. M. M., Lopes, N., Simões da Silva, L., Piloto, P., Franssen, J.-M., “Towards a consistent safety format of steel beam-columns: application of the new interaction formulae for ambient temperature to elevated temperatures”, submetido a *Steel and Composite Structures*, 2003.
- [5] Vila Real, P. M. M., Lopes, N., Simões da Silva, L., Franssen, J.-M., “Encurvadura Lateral de Vigas Metálicas Sujeitas à Acção do Fogo: uma Nova Proposta de Cálculo Simples Complementar ao EC3”, Actas do IV Congresso de Construção Metálica e Mista, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 4 e 5 de Dezembro, 2003.
- [6] Franssen, J.-M., “SAFIR. A Thermal/Structural Program Modeling Structures under Fire”, Proc. NASCC conference, American Inst. for Steel Constr., Baltimore, April 2003.
- [7] 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.
- [8] Boissonnade, N.; Jaspart, J.-P.; Muzeau, J.-P. and Villette, “New Interaction Formulae for Beam-Columns in Eurocode 3: The French-Belgian Approach”, Proceedings of Third European Conference on Steel Structures – Eurosteel 2002, António Lamas and Luís Silva (eds), Coimbra, Portugal, 19-20 September 2002.
- [9] Greiner, R., “Background information on the beam-column interaction formulae at level 1”, ECCS TC 8 Ad-hoc working group on beam-columns paper No.TC8-2001, Technical University Graz, 19 September 2001.