

Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2005  
Granada, 4 a 7 de Julio, 2005  
© SEMNI, España 2005

## MODELAÇÃO NUMÉRICA DA ENCURVADURA LATERAL DE VIGAS I EM AÇO INOXIDÁVEL SUJEITAS A TEMPERATURAS ELEVADAS

Lopes, N. <sup>1\*</sup>; Vila Real, P. M. M. <sup>1</sup>; Piloto, P. <sup>2</sup>; Mesquita, L. <sup>2</sup>; Simões da Silva, L. <sup>3</sup>

1: Secção Autónoma de Engenharia Civil  
Universidade de Aveiro  
3810-193 Aveiro  
e-mail: {nuno\_lopes,pvreal}@civil.ua.pt web: <http://www.ua.pt>

2: Instituto Politécnico de Bragança  
5300 Bragança  
e-mail: {ppiloto,lmesquita}@ipb.pt web: <http://www.ipb.pt>

3: Universidade de Coimbra  
3000 Coimbra  
e-mail: [luisss@dec.uc.pt](mailto:luisss@dec.uc.pt) web: <http://www.uc.pt>

**Palavras-chave:** Aço Inoxidável, Modelação Numérica, Encurvadura Lateral, vigas

**Resumo.** *A utilização de elementos estruturais em aço inoxidável tem vindo a crescer nos últimos anos, devido quer à sua maior resistência à corrosão quer à sua maior resistência mecânica ao fogo, quando comparado com o aço carbono.*

*Com o objectivo de modelar pelo Método dos Elementos Finitos a encurvadura lateral de vigas I em aço inoxidável sujeitas a altas temperaturas, introduziram-se as leis constitutivas de diferentes tipos de aço inoxidável no programa SAFIR. Trata-se de um programa de elementos finitos para análise não-linear geométrica e material, especialmente desenvolvido na Universidade de Liège para o estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo.*

*Neste trabalho pretende-se efectuar uma breve comparação das propriedades mecânicas do aço carbono com as do aço inoxidável a altas temperaturas e os resultados numéricos obtidos com esta nova versão do programa SAFIR, adaptado para tratar o aço inoxidável, com resultados obtidos com o programa comercial ANSYS, utilizando elementos finitos de viga e de casca.*

## 1. INTRODUÇÃO

A vantagem mais importante do aço inoxidável é a sua resistência à corrosão, no entanto, a sua aparência estética, facilidade de manutenção, durabilidade e os seus reduzidos custos de ciclo de vida são também características relevantes. É conhecido que a resistência ao fogo dos aços inoxidáveis é superior à dos aços carbono convencionais utilizados na construção. A utilização de elementos estruturais de aço inoxidável em edifícios, sem protecção contra incêndio, deve ser avaliada por razões estéticas, normalmente determinantes neste tipo de estruturas. Eliminar a protecção contra incêndio das estruturas resultará em custos de construção mais baixos, períodos de construção inferiores, uma utilização mais eficaz dos espaços interiores, melhor ambiente de trabalho e uma melhor aparência estética do edifício. Mais, o custo do ciclo de vida de estruturas de aço inoxidável não protegidas é menor do que o das estruturas em aço carbono com protecção contra incêndio.

Tendo em conta considerações económicas seria pouco provável que o aço inoxidável fosse escolhido em detrimento do aço carbono só por causa da sua maior resistência ao fogo. No entanto, para projectistas que considerem o aço inoxidável pelo seu aspecto e durabilidade, o benefício adicional de que o aço inoxidável consegue uma resistência ao fogo significativa sem protecção, pode inverter a escolha em favor do aço inoxidável. O aço inoxidável pode ser uma excelente solução, em aplicações onde a boa resistência à corrosão é requerida em conjunto com uma boa resistência ao fogo.

Actualmente os elementos estruturais em aço inoxidável são dimensionados com as mesmas expressões do aço carbono. No entanto, dado que o aço inoxidável exhibe leis constitutivas diferentes do aço carbono é de prever que as expressões de cálculo da resistência de elementos estruturais constituídos naqueles dois materiais sejam diferentes.

As ligas de aço inoxidável são caracterizadas pela suas relações tensão-deformação não lineares com uma baixa tensão de proporcionalidade e uma extensa fase de endurecimento. Não existe uma tensão de cedência bem definida, sendo usualmente considerado o valor da tensão correspondente a 0.2% de extensão. A lei constitutiva do aço inoxidável a temperaturas elevadas é necessária para determinar a capacidade resistente de estruturas em situação de incêndio.

A norma EN 1993-1-4 [1] “Supplementary rules for stainless steels” fornece regras de dimensionamento para elementos estruturais de aço inoxidável e apenas menciona a resistência ao fogo ao fazer referência à norma europeia para o dimensionamento de estruturas em aço em situação de incêndio, EN 1993-1-2 [2]. Mais recentemente (2002) Euro Inox e o Steel Construction Institute publicaram a segunda edição do “Designers Manual for Structural Stainless Steel” [3], onde é referido que as fórmulas para encurvadura lateral de vigas e para encurvadura de colunas são baseadas nas fórmulas do aço carbono para altas temperaturas.

O aço inoxidável tem inúmeras características desejáveis para um material estrutural. Embora o seu uso na construção esteja a aumentar, é ainda necessário desenvolver o conhecimento do seu comportamento em elementos estruturais.

Neste artigo apresentam-se as leis constitutivas do aço inoxidável à temperatura ambiente e a

temperaturas elevadas consignadas no Eurocódigo 3, respectivamente nas suas partes 1.4 [1] e 1.2 [2]. É também apresentado o elemento finito de viga 3D do programa SAFIR, que permite modelar o fenómeno da encurvadura lateral de vigas. Este elemento finito foi amplamente testado e validado para o caso do aço carbono [4-7].

É feita uma comparação dos resultados numéricos obtidos com o programa SAFIR, adaptado para poder modelar o aço inoxidável, com os resultados obtidos com o programa comercial ANSYS.

O caso escolhido para este estudo foi o fenómeno da encurvadura lateral para apenas um tipo de aço inoxidável. Assim foram introduzidas no programa ANSYS as propriedades mecânicas do aço inoxidável em estudo, para as diferentes temperaturas analisadas.

## 2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO INOXIDÁVEL A ALTAS TEMPERATURAS

O aço quando sujeito a altas temperaturas sofre grandes alterações nas suas propriedades mecânicas. De facto, com o aumento da temperatura, verificam-se reduções da tensão de cedência e do módulo de elasticidade linear.

No caso do aço inoxidável os valores nominais das tensões de cedência ( $f_y$ ) e tensão última ( $f_u$ ) à temperatura ambiente, em perfis laminados a quente, indicados na norma EN 10088, são resumidas na Tabela 1, para os vários tipos de aço inoxidável cujas propriedades mecânicas são conhecidas a altas temperaturas. Esta classificação é a referida na parte 1-4 do Eurocódigo 3 [1].

Tipo de aço inoxidável	Classe	Tensão de cedência ( $f_y$ )	Tensão última ( $f_u$ )	Módulo de elasticidade ( $E$ )
		(MPa)	(MPa)	(MPa)
Austeníticos	1.4301	210	520	200000
	1.4401	220	530	200000
	1.4404	220	530	200000
	1.4571	220	540	200000
Ferrítico	1.4003	280	450	210000
Austenítico-ferrítico	1.4462	460	660	200000

Tabela 1 – Valores nominais da tensão de cedência, da tensão última e do módulo de elasticidade de perfis de aço inoxidável laminados a quente (EN 10088)

Tal como para temperatura ambiente, a temperaturas elevadas, a variação das propriedades mecânicas do aço pode ser determinada através de ensaios de tracção e flexão.

A lei constitutiva proposta pela parte 1-2 do Eurocódigo 3 [2] é representada na Figura 1 e os parâmetros envolvidos são descritos na Tabela 2

Gama de extensões	Tensão $\sigma$	Módulo de Elasticidade tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c,\theta}$	$\frac{E \cdot \varepsilon}{1 + a \cdot \varepsilon^b}$	$\frac{E(1 + a \cdot \varepsilon^b - a \cdot b \cdot \varepsilon^b)}{(1 + a \cdot \varepsilon^b)^2}$
$\varepsilon_{c,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{0,2p,\theta} - e + (d/c)\sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}$	$\frac{d + (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)}{c\sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2}}$
Parâmetros	$\varepsilon_{c,\theta} = f_{0,2p,\theta} / E_{a,\theta} + 0.002$	
Funções	$a = \frac{E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta} - f_{0,2p,\theta}}{f_{0,2p,\theta} \varepsilon_{c,\theta}^b}$	$b = \frac{(1 - \varepsilon_{c,\theta} E_{ct,\theta} / f_{0,2p,\theta}) E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta}}{(E_{a,\theta} \varepsilon_{c,\theta} / f_{0,2p,\theta} - 1) f_{0,2p,\theta}}$
	$c^2 = (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) \left( \varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta} + \frac{e}{E_{ct,\theta}} \right)$	$d^2 = e (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) E_{ct,\theta} + e^2$
	$e = \frac{(f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta})^2}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta}) E_{ct,\theta} - 2(f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta})}$	

Tabela 2 – Lei constitutiva do aço inoxidável para altas temperaturas

Na relação tensão-extensão proposta distinguem-se duas zonas:

- a primeira é uma zona quase linear até à tensão limite de proporcionalidade de tensão;
- e a segunda é uma curva até à tensão última;

Esta relação constitutiva, para o aço sujeito a temperaturas elevadas, pode ser utilizada na determinação da resistência dos elementos metálicos (à tracção, à compressão, à flexão e ao corte).

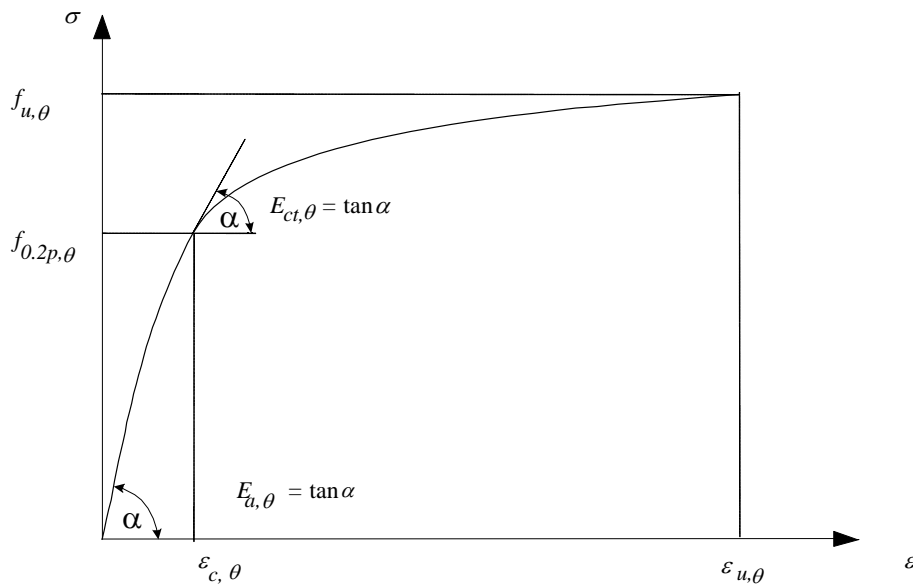


Figura 1 – Representação gráfica da lei constitutiva do aço inoxidável para altas temperaturas

À semelhança do que acontece com o aço carbono, as propriedades mecânicas do aço inoxidável, quando este é sujeito a altas temperaturas, sofrem reduções significativas. No entanto, no caso do aço inoxidável, essas reduções dependem da qualidade do aço. Assim a Tabela 3 apresenta os factores de redução para a relação tensão-extensão do aço 1.4301 (apresentado na Tabela 1) sujeito a temperaturas elevadas de acordo com a parte 1-2 do Eurocódigo 3 [2].

Os factores de redução apresentados na Tabela 3 são:

- o factor de redução do módulo de elasticidade linear  $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$ ;
- o factor de redução para a tensão de proporcionalidade  $k_{0.2p,\theta} = f_{0.2p,\theta} / f_y$ ;
- o factor de redução para a tensão última  $k_{u,\theta} = f_{u,\theta} / f_u$ ;
- e o factor de redução do módulo de elasticidade linear  $k_{E_{ct},\theta} = E_{ct,\theta} / E_a$ ;

em que:

$E_a$  – É o valor do módulo de elasticidade linear à temperatura ambiente;

$E_{a,\theta}$  e  $E_{ct,\theta}$  – São os valores dos módulos de elasticidade linear à temperatura  $\theta$  tal como se ilustra na Figura 1;

$f_y$  e  $f_u$  – São os valores da tensão de cedência e da tensão última à temperatura ambiente;

$f_{y,\theta}$  e  $f_{u,\theta}$  – São os valores da tensão de cedência e da tensão última à temperatura  $\theta$ ;

$f_{0.2p,\theta}$  – É o valor da tensão de proporcionalidade à temperatura  $\theta$ ;

Para além dos factores de redução, a Tabela 3 apresenta também um factor para a determinação da tensão de cedência a altas temperaturas,  $k_{2\%,\theta}$ , e a extensão última, em função da temperatura no aço.

$\theta_a$	$k_{E,\theta}$	$k_{0.2p,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{2\%,\theta}$	$k_{Ect,\theta}$	$\varepsilon_{u,\theta}$
<b>Classe 1.4301</b>						
20	1	1	1	0.26	0.11	0.4
100	0.96	0.82	0.87	0.24	0.05	0.4
200	0.92	0.68	0.77	0.19	0.02	0.4
300	0.88	0.64	0.73	0.19	0.02	0.4
400	0.84	0.6	0.72	0.19	0.02	0.4
500	0.8	0.54	0.67	0.19	0.02	0.4
600	0.76	0.49	0.58	0.22	0.02	0.35
700	0.71	0.4	0.43	0.26	0.02	0.3
800	0.63	0.27	0.27	0.35	0.02	0.2
900	0.45	0.14	0.15	0.38	0.02	0.2
1000	0.2	0.06	0.07	0.4	0.02	0.2
1100	0.1	0.03	0.03	0.4	0.02	0.2
1200	0	0	0	0.4	0.02	0.2

Tabela 3 – Factores de redução para a relação tensão-extensão e extensão última dos aços inoxidáveis 1.4301 a altas temperaturas

### 3. OS PROGRAMAS UTILIZADOS

Este artigo pretende validar o programa SAFIR após as alterações que lhe foram introduzidas no sentido de poder modelar elementos estruturais em aço inoxidável, nomeadamente após a introdução no código de elementos finitos das propriedades térmicas e mecânicas dos aços inoxidáveis. Esta validação foi efectuada através de uma análise paramétrica com o programa ANSYS. Nos pontos seguintes são feitas breves descrições destes dois programas.

#### 3.1. O programa SAFIR

O programa de elementos finitos SAFIR [8] é um código de elementos finitos, para análise não linear geométrica e material, especialmente desenvolvido na Universidade de Liège para o estudo de estruturas sujeitas à acção do fogo.

O elemento de viga utilizado consiste num elemento tridimensional (3D) com base nas seguintes hipóteses e formulações:

- Elementos prismáticos;
- A deformada do elemento é descrita pelos deslocamentos de três nós, dois nas extremidades com sete graus de liberdade cada, três translações, três rotações e uma amplitude de empenamento, e o último no centro do elemento tendo apenas um grau de liberdade que representa a parte não-linear do deslocamento

longitudinal, como se ilustra na Figura 2;

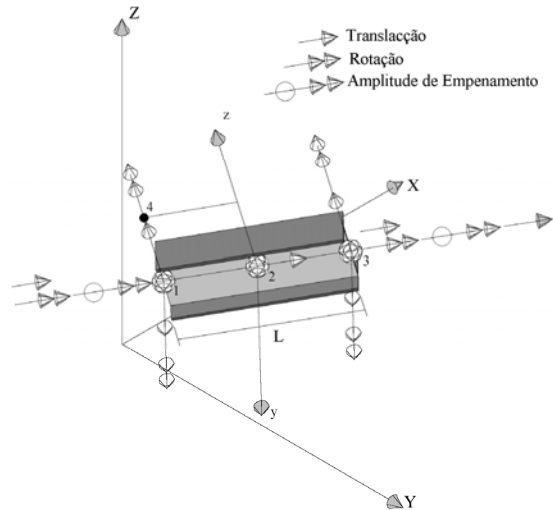


Figura 2 – Elemento de viga tridimensional com 15 graus de liberdade.

- Foi considerada a hipótese de Bernoulli, segundo a qual, na flexão, secções planas antes da deformação mantêm-se planas após deformação e perpendiculares ao eixo longitudinal. Neste elemento não é considerada a deformação devido ao esforço transversal;
- Não são considerados fenómenos de encurvadura local, pelo que, testes numéricos com este elemento só podem ser feitos com perfis das classes 1 e 2 [1];
- As deformações axiais existentes são pequenas, ou seja, foi utilizada a hipótese de von Kármán descrita na seguinte expressão

$$\frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \ll 1 \quad (1)$$

onde  $u$  é o deslocamento longitudinal e  $x$  a coordenada longitudinal;

- Supõe-se também que as rotações são pequenas, excepto a que se verifica em torno do eixo da viga, o que significa que se podem utilizar as aproximações,  $\sin \varphi \cong \varphi$  e  $\cos \varphi \cong 1$ , em que  $\varphi$  representa o ângulo formado pela tangente à deformada da viga e a sua posição inicial;
- A integração longitudinal é calculada numericamente através do método de Gauss;
- A secção transversal foi discretizada em elementos triangulares e rectangulares (bidimensionais), a viga é constituída por fibras que correspondem ao prolongamento dos elementos. Em qualquer ponto longitudinal de integração, todas as variáveis (temperatura, tensões e extensões) são constantes em cada fibra;

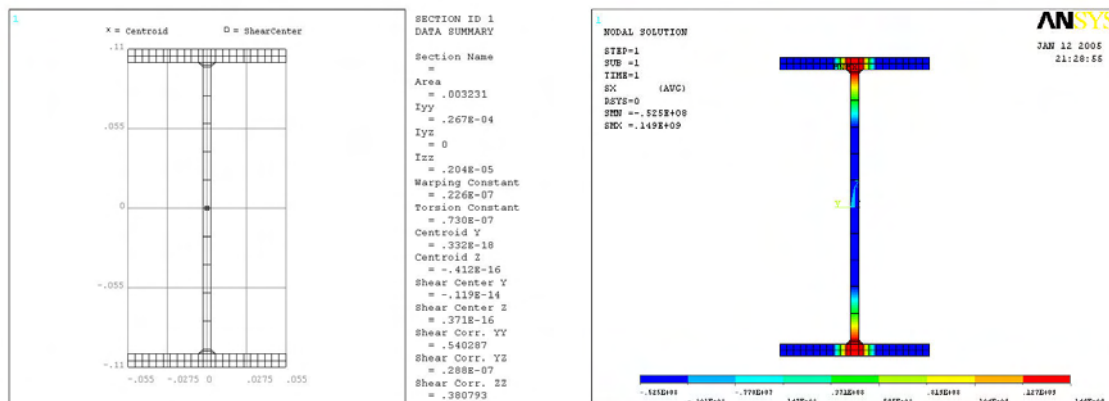
- A matriz de rigidez não-linear é avaliada em cada iteração do processo de convergência usando o método de Newton-Raphson;
- As tensões residuais são consideradas através de tensões iniciais que permanecem constantes [9];
- O comportamento do material no caso de descarga é elástico, com módulo de elasticidade igual ao módulo de Young da origem da curva tensão-extensão. Presume-se que a extensão plástica não é afectada pela variação de temperatura [10];
- A rigidez à torção foi ajustada de maneira a ter em consideração a temperatura, reflectindo a diminuição desta propriedade mecânica com o aumento da temperatura [11].

Para ter em consideração o aço inoxidável, foram introduzidas no SAFIR, as leis constitutivas dos aços inoxidáveis apresentados na Tabela 1, e definidas de acordo com a Tabela 2 [2]. Foram também introduzidos o alongamento térmico, o calor específico e a condutividade térmica dos aços inoxidáveis referidos na Tabela 1. No entanto estas propriedades térmicas não foram utilizadas neste trabalho, visto ter-se utilizado temperaturas constantes em toda a secção transversal.

### 3.2. O programa ANSYS

No programa ANSYS foram utilizados dois tipos de elementos finitos: o elemento de viga BEAM189 e o elemento de casca SHELL181.

O elemento de viga utilizado é um elemento de viga quadrático de 3 nós baseado na teoria de vigas de Timoshenko. A deformação de corte é constante na secção transversal e as secções mantêm-se planas e sem distorção após deformação. Possui sete graus de liberdade por nó, três deslocamentos, três rotações e uma amplitude de empenamento, com capacidade para análises não lineares de geometria e de material. A secção transversal foi discretizada com elementos, definidas por nove nós e quatro pontos de integração, como apresentado na Figura 3. As tensões residuais foram aplicadas nos pontos de integração da secção transversal, sendo constantes ao longo das espessuras da alma e do banzo.





a) Discretização da secção transversal.

b) Distribuição das Tensões residuais.

Figura 3 – Secção transversal do elemento de viga BEAM189.

O elemento de casca utilizado possui 6 graus de liberdade em cada nó (três translações e três rotações). A variação de espessura da casca é considerada na análise não-linear deste problema. Este elemento apresenta 4 pontos da integração sobre a sua superfície, com 5 pontos da integração na espessura.

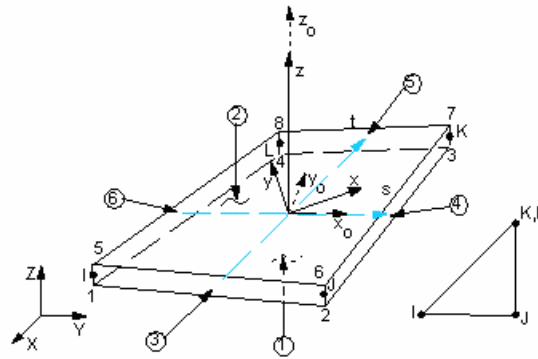


Figura 4 – Geometria do elemento de casca.

Cada modelo é construído com base na geometria da espessura média, como representado na Figura 6b), discretizado com 10 elementos finitos na alma e no banzo. O efeito da sobreposição das áreas de intersecção da alma com o banzo foi considerado, através da normalização dos resultados da capacidade resistente da viga,  $M/M_{pl}$  [AnsysS].

O modelo de endurecimento isotrópico de plasticidade de von Mises pode ser escolhido com a opção MISO “multilinear isotropic hardening”. Este modelo permite a introdução das propriedades mecânicas do aço inoxidável para as temperaturas em estudo, através da definição da curva tensão-extensão total. A inclinação do primeiro segmento da curva deve corresponder ao módulo elástico do material e nenhuma inclinação do segmento deve ser superior. Nenhum segmento pode ter uma inclinação inferior a zero. As curvas de tensão-extensão dependentes da temperatura podem ser introduzidas para cada nível de temperatura considerado (temperatura ambiente, 400, 500, 600 e 700 °C), como representado na Figura 5.

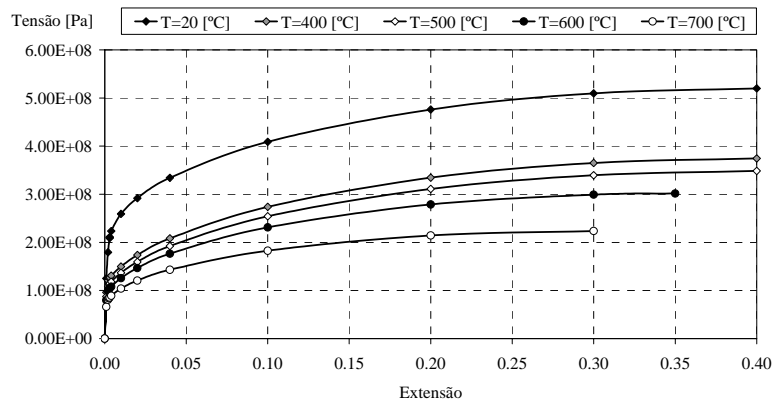


Figura 5 –Curvas de tensão-estiramento para o aço inoxidável 1.4301.

As condições de fronteira nos apoios foram definidas de modo a impedir o deslocamento lateral e vertical, assim como a rotação segundo o eixo longitudinal da viga. No modelo constituído por elementos finitos de viga, procedeu-se à análise de metade do modelo, considerando condições de simetria, como se representa na Figura 6a). No modelo de casca, o carregamento mecânico foi modelado recorrendo à aplicação de binários visando a diminuição de possíveis efeitos localizados, conforme se representa na Figura 6b).

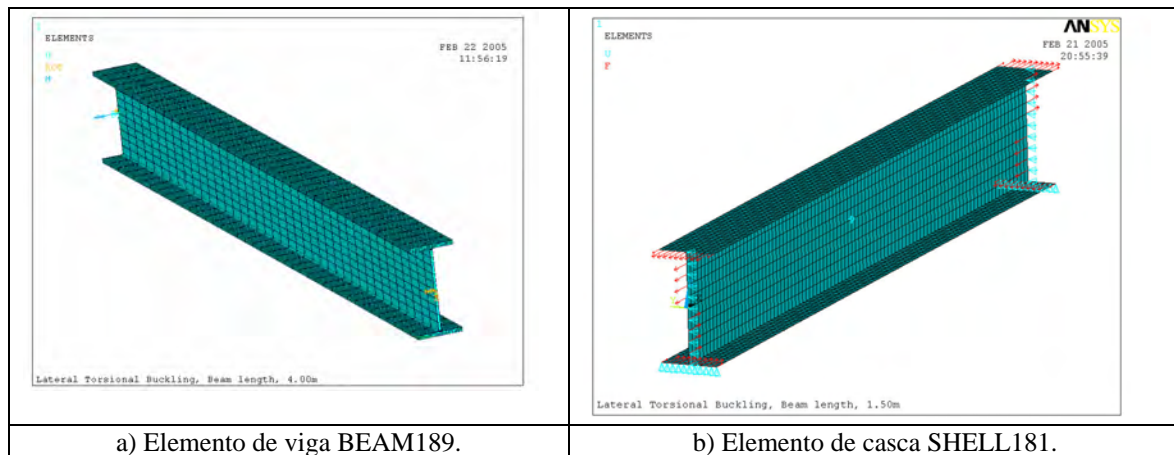


Figura 6 – Modelo de elementos finitos e condições de fronteira.

A análise não linear foi executada até ao colapso, instante em que deixa de ser possível manter o equilíbrio. Considerou-se uma formulação de grandes deslocamentos. A solução foi controlada pela carga, utilizando o método de iteração de Newton-Raphson e o critério de plasticidade de von Mises com endurecimento isotrópico.

## 4. FORMULAÇÃO PRECONIZADA NO EUROCÓDIGO 3 PARA A ENCURVADURA LATERAL

### 4.1. Momento resistente à temperatura ambiente

De acordo com o prEN 1993-1-4 [1], o momento resistente à encurvadura lateral para secções das classes 1 e 2, de elementos em aço inoxidável à temperatura ambiente, é obtido através de:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_y \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

onde,  $\chi_{LT}$  é dado por

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \chi_{LT} \leq 1 \quad (3)$$

com

$$\phi_{LT} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (4)$$

Nesta parte do Eurocódigo 3 [1] o factor de imperfeição  $\alpha_{LT}$  é igual a 0.34 para secções enformadas a frio e para secções tubulares, enquanto que para secções abertas soldadas ou outras secções que não possuam testes disponíveis deverá ser igual a 0.76, valor utilizado neste estudo.

A esbelteza adimensional para a encurvadura lateral obtêm-se a partir de

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} \quad (5)$$

em que  $M_{cr}$  é o momento crítico elástico.

O Eurocódigo permite a dispensa da verificação da encurvadura lateral para

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0.4 \text{ ou } \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0.16 \quad (6)$$

### 4.2. Momento resistente a temperatura elevada

Para altas temperaturas, a parte 1-4 do Eurocódigo 3, relativa ao aço inoxidável, refere que deve ser utilizada a mesma formulação prescrita para elementos de aço carbono de acordo com o prEN 1993-1-2 [2], onde o momento resistente à encurvadura lateral para secções das

classes 1 e 2, é dado por

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (7)$$

sendo  $\chi_{LT,fi}$  dado por

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{(\phi_{LT,\theta})^2 - (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2}} \quad (8)$$

com

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (9)$$

Nesta expressão o factor de imperfeição  $\alpha$  é função da classe do aço e é dado por

$$\alpha = 0.65 \sqrt{235 / f_y} \quad (10)$$

A esbelteza adimensional da encurvadura lateral para altas temperaturas é calculada através de

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[ \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0.5} \quad (11)$$

onde:

$\bar{\lambda}_{LT}$  é dado pela expressão (5);

$k_{E,\theta}$  é o factor de redução do módulo de elasticidade linear de acordo com a Tabela 3;

e  $k_{y,\theta}$  é o factor de redução da tensão de cedência que se determina através de

$$k_{y,\theta} = \left[ f_{0,2p,\theta} + k_{2\%,\theta} (f_{u,\theta} - f_{0,2p,\theta}) \right] \frac{1}{f_y} \quad \text{mas } k_{y,\theta} \leq 1.0 \quad (12)$$

As propriedades mecânicas do aço inoxidável a altas temperaturas, a ter em conta, para a utilização destas expressões, encontram-se na parte 1-2 do Eurocódigo 3 [2].

## 5. ANÁLISE PARAMÉTRICA

### 5.1. Caso estudado

Estudou-se uma viga simplesmente apoiada com apoios em forquilha. A viga está sujeita a um diagrama uniforme de momentos como mostra a Figura 7. Foi usado uma secção

equivalente a um IPE 220 soldado em aço inoxidável da classe 1.4301 (ver Tabela 1).

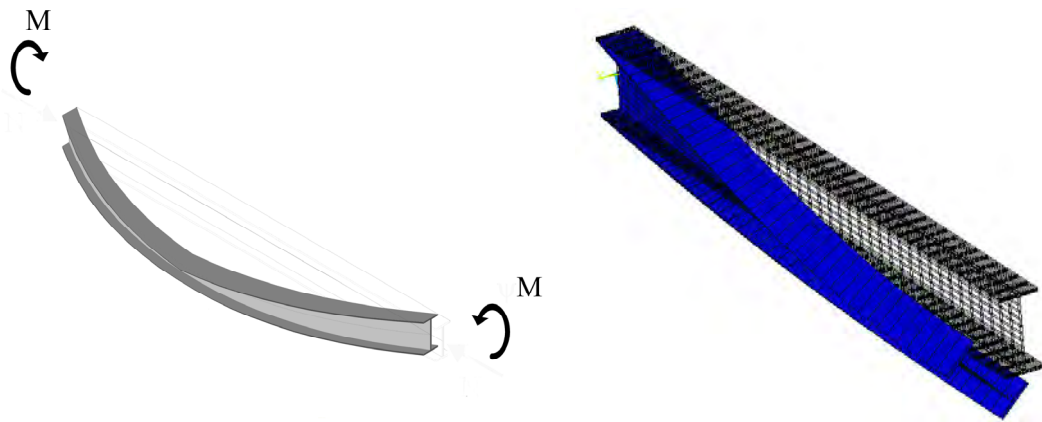


Figura 7 – Deformada de uma viga simplesmente apoiada sujeita a flexão uniforme.

Estudou-se o comportamento das vigas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. Foram consideradas temperaturas uniformes na secção transversal. Neste trabalho as temperaturas consideradas foram 400, 500, 600 e 700 °C, com o objectivo de representar adequadamente a maioria das situações práticas. Foi considerada uma imperfeição geométrica lateral dada pela expressão

$$y(x) = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (13)$$

em que  $l$  é o comprimento total da viga.

As tensões residuais adoptadas seguem a distribuição clássica para perfis I soldados, como se mostra na Figura 8, constantes na espessura da alma e do banzo, [12].

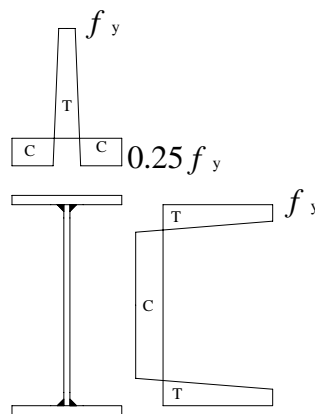


Figura 8 – Distribuição das tensões residuais (C – compressão, T – tracção).

## 5.2. Comparação de resultados

Na Figura 9 apresentam-se os resultados dos testes efectuados à temperatura ambiente. A curva de encurvadura lateral preconizada na parte 1-4 do Eurocódigo 3 para o aço inoxidável é designada neste gráfico por “prEN 1993-1-4”, os resultados obtidos com o elemento de viga do SAFIR são denominados por “Safir”, e os obtidos com o ANSYS são designados por “AnsysB” para o elemento de viga e “AnsysS” para o elemento de casca.

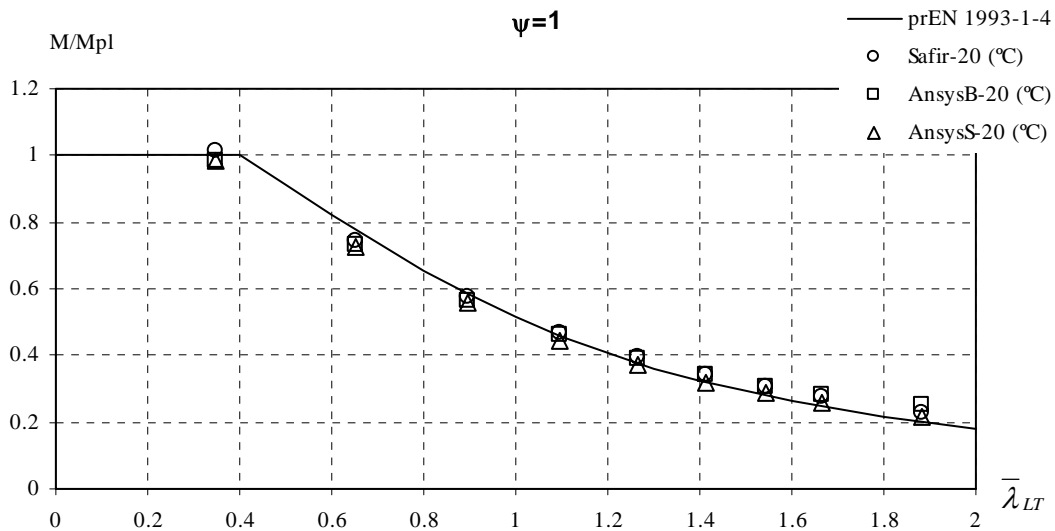


Figura 9 – Resultados para temperatura ambiente

Nas Figuras 11, 12, 13 e 14 apresentam-se os resultados dos testes efectuados para 400, 500, 600 e 700 °C respectivamente. A curva de encurvadura lateral preconizada na parte 1-2 do Eurocódigo 3 para o aço inoxidável é designada nestes gráficos por “prEN 1993-1-2”, sendo os resultados obtidos com o programa SAFIR e com o programa ANSYS designados como anteriormente.

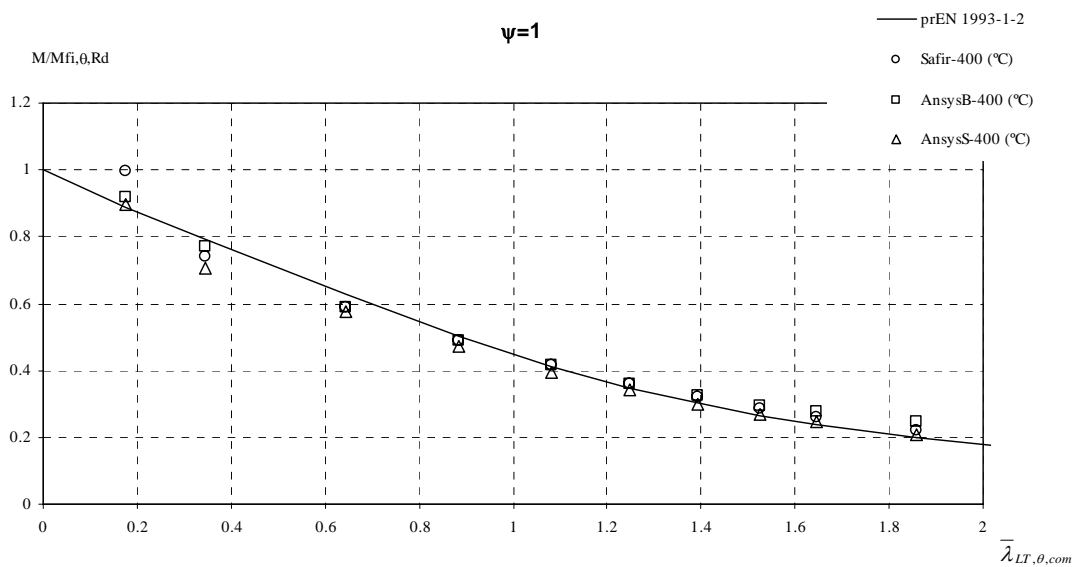


Figura 10 – Resultados para 400°C

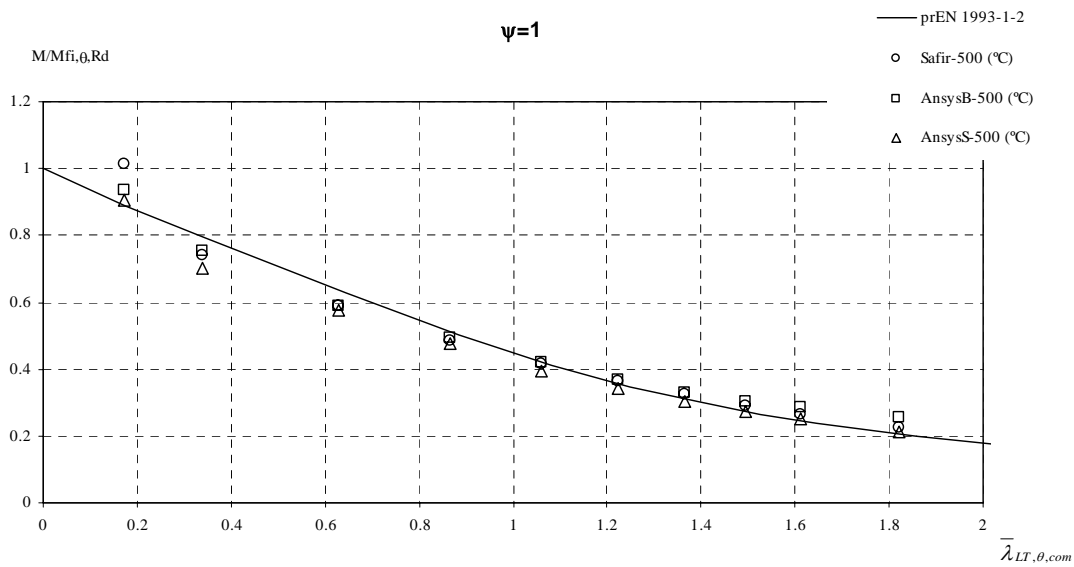


Figura 11 – Resultados para 500°C

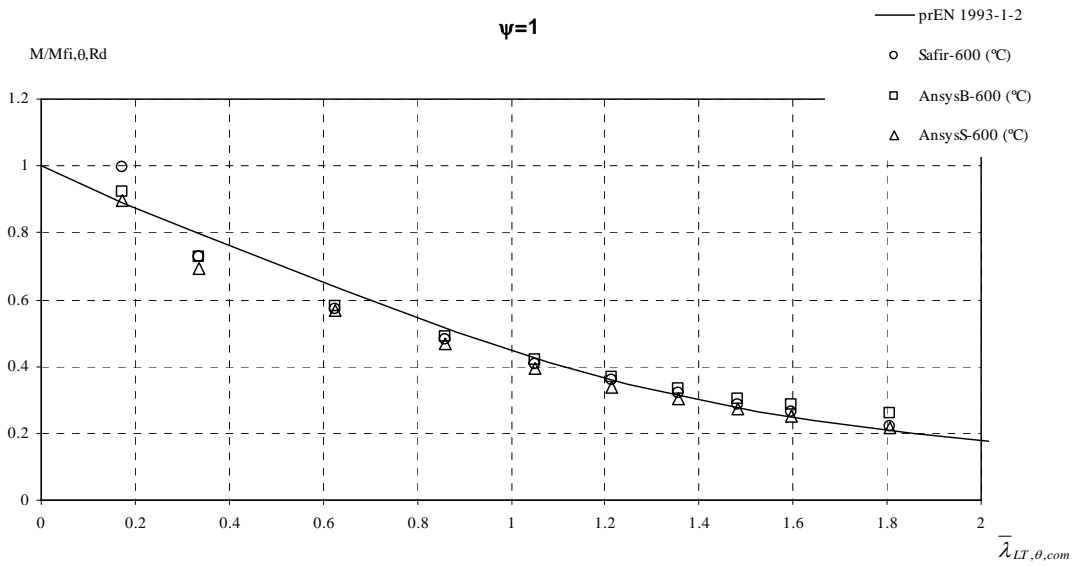


Figura 12 – Resultados para 600°C

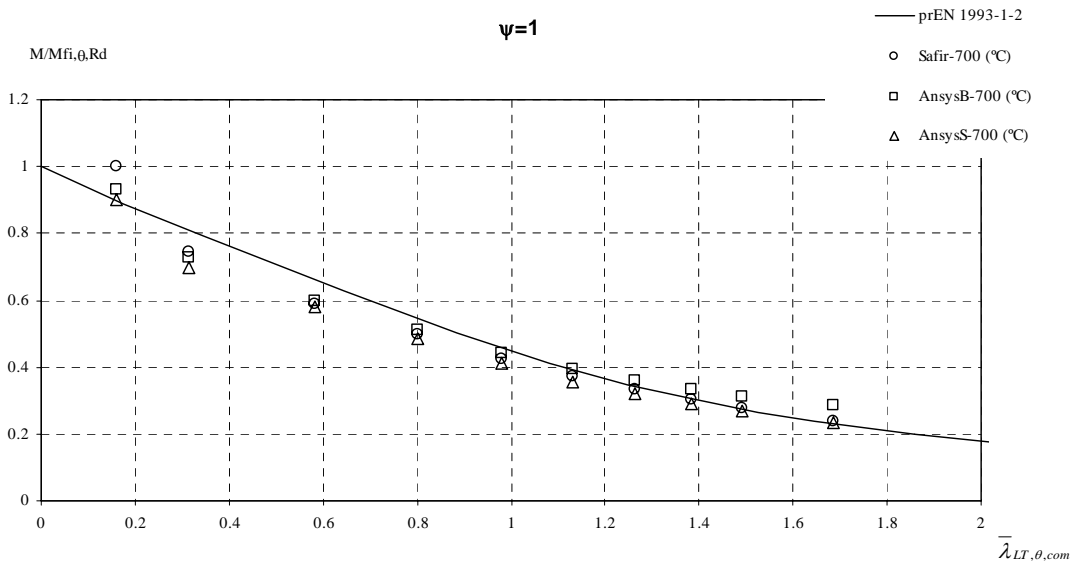


Figura 13 – Resultados para 700°C

## 6. CONCLUSÕES

Dos gráficos apresentados nas figuras 9 a 13 verifica-se que os resultados obtidos para os três elementos finitos utilizados (elemento de viga do programa SAFIR e elementos de viga e de



casca do programa ANSYS) exibem uma grande semelhança. Assim conclui-se que as propriedades mecânicas, do aço inoxidável a temperaturas elevadas, foram correctamente introduzidas no programa SAFIR.

Dos gráficos das figuras 10 a 13, constata-se que a curva de resistência à encurvadura lateral, para o aço inoxidável a temperaturas elevadas, preconizada na parte 1-2 do Eurocódigo 3, não se encontra do lado da segurança, principalmente para uma gama de valores de esbelteza adimensional intermédia, pelo que deve ser alterada.

Uma proposta de alteração desta curva de encurvadura lateral da parte 1-2 do Eurocódigo 3, para o aço inoxidável, constituirá o objectivo de trabalhos futuros em que se procurará estudar outras secções transversais, outras qualidades de aço inoxidável e outros tipos de carregamentos.

## REFERÊNCIAS

- [1] European Committee for Standardisation, *Eurocode 3, Design of Steel Structures – part 1-4. General rules – Supplementary Rules for Stainless Steels*, Brussels, Belgium, (2004).
- [2] European Committee for Standardisation, *Eurocode 3, Design of Steel Structures – part 1-2. General rules – Structural fire design*, Brussels, Belgium, (2003).
- [3] Euro Inox e Steel Construction Institute *Designers Manual for Structural Stainless Steel*, (2002).
- [4] P. M. M. Vila Real e J.-M. Franssen, “Numerical Modelling of Lateral Buckling of Steel I Beams Under Fire Conditions – Comparison with Eurocode 3”, Vol. 11, No. 2, pp. 112-128, *Journal of Fire Protection Engineering*, USA, (2001).
- [5] P. M. M. Vila Real, P. A. G. Piloto, J.-M. Franssen, “A New Proposal of a Simple Model for the Lateral-Torsional Buckling of Unrestrained Steel I-Beams in Case of Fire: Experimental and Numerical Validation”, *Journal of Constructional Steel Research*, ELSEVIER, Vol 59/2 pp. 179-199, (2003).
- [6] P. M. M. Vila Real, R. Cazeli, L. Simões da Silva, A. Santiago, P. A. G. Piloto, “The Effect of Residual Stresses in the Lateral-Torsional Buckling of Steel I-Beams at Elevated Temperature”, *Journal of Constructional Steel Research*, ELSEVIER, 60/3-5, pp.783-793, (2004).
- [7] P. M. M. Vila Real, N. Lopes, L. Simões da Silva, J.-M. Franssen, “Lateral-Torsional Buckling of Unrestrained Steel Beams Under Fire Conditions: Improvement of EC3 Proposal”, *Computer & Structures*, ELSEVIER, 82/20-21 pp. 1737-1744, (2004).
- [8] J.-M. Franssen, *SAFIR. A Thermal/Structural Program Modeling Structures under Fire*, Proc. NASCC conference, American Inst. for Steel Constr., Baltimore, (2003).
- [9] J.-M. Franssen, “Modelling of the residual stresses influence in the behaviour of hot-rolled profiles under fire conditions”, (em francês), *Construction Métallique*, Vol. 3, pp. 35-42, (1989).
- [10] J.-M. Franssen, “The unloading of building materials submitted to fire”, *Fire Safety Journal*, Vol. 16, pp. 213-227, (1990).

- [11] V. Souza e J.-M. Franssen, *Lateral Buckling of Steel I Beams at Elevated Temperature – Comparison between the Modelling with Beam and Shell Elements*, Proc. 3rd European Conf. On Steel Structures, ISBN: 972-98376-3-5, Coimbra, Univ. de Coimbra, A. Lamas & L. Simões da Silva ed., pp. 1479-1488, (2002).
- [12] W. F. Chen e E. M. Lui, *Stability design of steel frames*, CRC Press, 1991.