





[Áreas](#)

[Autores](#)

[Ponencias](#)

[Buscar](#)

[Comités](#)

[Agradecimientos](#)

**Modelação Numérica de Elementos Estruturais em Aço Inoxidável com Secções Esbeltas em Situação de Incêndio**

**Piloto P.**

- Lopes N. - Vila Real P. - Mesquita L. - Simões da Silva L.



## MODELAÇÃO NUMÉRICA DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS EM AÇO INOXIDÁVEL COM SECÇÕES ESBELTAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

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

1: Departamento de Engenharia Civil  
LABEST  
Universidade de Aveiro  
3810-193 Aveiro, Portugal  
e-mail: {nuno.lopes,pvreal}@ua.pt, web: <http://www.ua.pt>

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

3: Departamento de Engenharia Civil  
ISISE - Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra  
3030 Coimbra, Portugal  
e-mail: [luisss@dec.uc.pt](mailto:luisss@dec.uc.pt) web: <http://www.uc.pt>

**Palavras-chave:** Elementos estruturais metálicos de classe 4, Elementos finitos de casca, Tensões residuais

**Resumo.** Neste trabalho, a resposta estrutural de elementos esbeltos em aço inoxidável submetidos a incêndio é analisada numericamente através de programas de elementos finitos geométrica e materialmente não lineares. Com o intuito de realizar estas simulações, foram necessárias duas alterações no programa SAFIR: i) foi introduzida a lei constitutiva 2D do aço inoxidável, para ser usada em elementos de casca e ii) foi introduzida a possibilidade do programa considerar tensões residuais em elementos finitos de casca. A lei constitutiva utilizada do aço inoxidável foi a apresentada na parte 1.2 do Eurocódigo 3. Para modelar o endurecimento exibido pelos aços inoxidáveis, usando a formulação de elementos de casca, foi necessária uma aproximação à referida lei constitutiva do Eurocódigo 3. Imperfeições geométricas locais e globais foram consideradas nas simulações numéricas. Por fim, este trabalho mostrará também a influência das tensões residuais na capacidade resistente em situação de incêndio, de elementos estruturais esbeltos em aço inoxidável.

## 1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável tem várias características desejáveis num material estrutural [1][2][3]. Mas, mesmo com a sua utilização a aumentar na construção, é ainda necessário desenvolver o conhecimento do seu comportamento estrutural, especialmente quando sujeito a temperaturas elevadas. Os aços inoxidáveis são conhecidos pelas suas leis constitutivas não lineares com um baixo limite de proporcionalidade e uma extensa fase de endurecimento. Este não tem uma tensão de cedência bem definida, e consequentemente o limite de elasticidade convencional a 0.2% é geralmente considerado em cálculos simples.

A EN 1993-1-4 “Regras suplementares para aços inoxidáveis” [4] fornece regras de dimensionamento para elementos estruturais em aço inoxidável à temperatura ambiente. Nesta parte do Eurocódigo 3, a avaliação da resistência ao fogo do aço inoxidável é remetida para a parte de fogo do mesmo Eurocódigo (EN 1993-1-2) [5], onde se indica que as fórmulas de dimensionamento para elementos em aço de carbono podem ser usadas para elementos do aço inoxidável. No entanto, estes dois materiais possuem propriedades mecânicas a temperaturas elevadas diferentes como mostra a figura 1. A lei constitutiva do aço inoxidável 1.4301 a 600 °C é aqui comparada com a lei constitutiva do aço de carbono à mesma temperatura, de acordo com as prescrições da parte 1.2 do Eurocódigo 3.

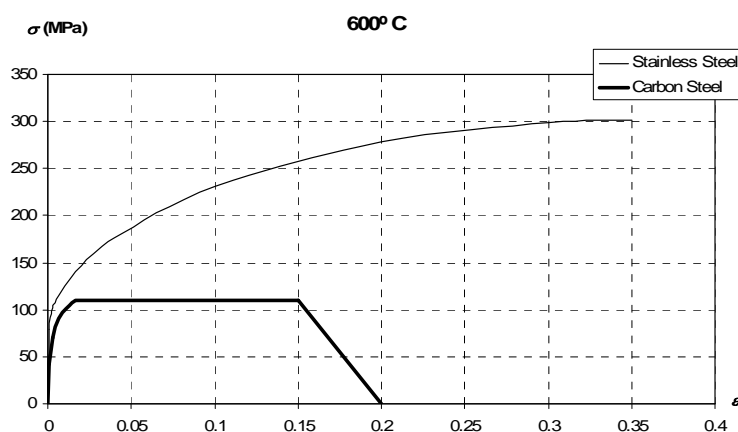


Figura 1. Comparação entre as leis constitutivas do aço carbono S235 e do aço inoxidável 1.4301 a 600 °C.

O programa SAFIR [6], programa de elementos finitos não linear geométrico e material, desenvolvido especialmente para modelar o comportamento de estruturas em caso de incêndio, foi utilizado nas simulações numéricas. Este programa foi adaptado de acordo com as propriedades materiais definidas na EN 1993-1-4 [4] e na EN 1993-1-2 [5], para modelar o comportamento de estruturas em aço inoxidável.

Uma aproximação à lei constitutiva do aço inoxidável do Eurocódigo 3 [5] foi introduzida devido ao facto de a lei constitutiva do aço inoxidável não poder ser analiticamente invertida

como será explicado.

Devido a o programa tomar em consideração as tensões residuais transformando as primeiramente em extensões residuais e adicionando-as em seguida às outras extensões iniciais [7], foi necessário executar um procedimento que fizesse esta conversão considerando a não linearidade da lei constitutiva do aço inoxidável.

O objectivo do estudo apresentado neste artigo é avaliar a precisão da lei de endurecimento introduzida para os elementos finitos de casca no programa SAFIR e estudar a influência das tensões residuais em secções transversais de paredes finas em aço inoxidável.

## 2. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

As principais modificações feitas no programa foram:

- modificar o programa com o objectivo de este poder utilizar o modelo constitutivo 2D do aço inoxidável, para ser usado em elementos finitos de casca;
- introduzir a possibilidade de ter em consideração tensões residuais em elementos de casca para o aço inoxidável.

### 2.1 Implementação da lei constitutiva do aço inoxidável 2D

A modelação do aço inoxidável foi feita num estado plano de tensão não elástico, baseado na superfície de von Mises e em endurecimento isotrópico.

O elemento finito de casca implementado foi programado para ser utilizado em grandes deformações no estado plano de tensões. Este elemento finito foi introduzido primeiramente para os materiais elásticos e depois para leis constitutivas elasto-plásticas bidimensionais [8].

A lei constitutiva do aço inoxidável não tem nenhum domínio elástico. A lei introduzida no programa ajusta-se com a lei uni-axial prescrita na parte 1.2 do Eurocódigo 3 [5] descrita na tabela 1 e na figura 2.

A mesma formulação utilizada em aço de carbono [8] foi usada para o aço inoxidável, mas, devido à impossibilidade de inverter a lei constitutiva (ver tabela 1) para a primeira fase da curva ( $\varepsilon < \varepsilon_{c,\theta}$ ), foi necessário o desenvolvimento de uma aproximação.

Extensões	Tensões $\sigma$	Módulo 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 1. Expressões da lei constitutiva do aço inoxidável a altas temperaturas [5].

A lei constitutiva dada pela função  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  (apresentada na tabela 1) serviu de base à lei de endurecimento implementada  $\tau = \tau(k)$ , que foi obtida utilizando  $\varepsilon = k + \frac{\sigma}{E}$  e fazendo  $\tau = \sigma$  (ver figura 2).

Para a segunda fase ( $\varepsilon_{c,\theta} \leq \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$ ) foi possível a utilização deste procedimento para directamente obter a lei de endurecimento, mas para  $\varepsilon < \varepsilon_{c,\theta}$  a equação  $\sigma = E \cdot \varepsilon / (1 + a \cdot \varepsilon^b)$  não pode ser invertida. Consequentemente, a equação (1), que aproxima a lei de endurecimento para a primeira fase da lei constitutiva do aço inoxidável, foi desenvolvida.

$$\tau = b \cdot k^2 + c \cdot k + d + a \cdot \sqrt{k} \quad (1)$$

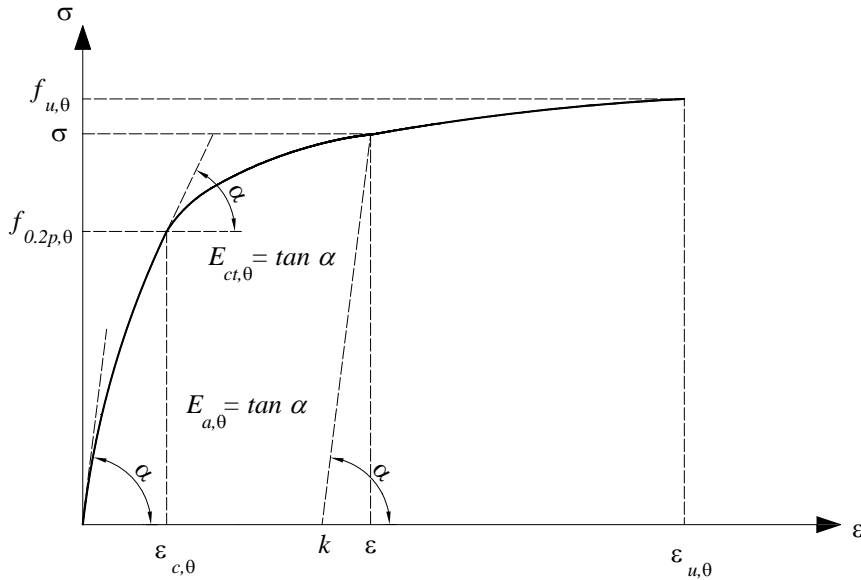


Figura 2. Lei constitutiva do aço inoxidável a temperaturas elevadas.

Os parâmetros a, b, c e d foram obtidos impondo que essa equação (1) satisfizesse as

condições de fronteira em ambas as extremidades da curva ( $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{c,\theta}$ ), tendo por resultado

$$\begin{cases} a = 56.0362 \cdot f_{0.2p,\theta} - 0.112 \cdot h \\ b = 63501.9 \cdot f_{0.2p,\theta} - 127.1 \cdot h \\ c = -880.512 \cdot f_{0.2p,\theta} + 2.763 \cdot h \\ d = 0.001 \cdot f_{0.2p,\theta} \end{cases} \quad (2)$$

onde  $h$  é o valor de  $\frac{\partial \tau}{\partial k}$  (0.002) no segundo tramo.

A figura 3 apresenta uma comparação entre a lei constitutiva obtida com o Eurocódigo 3 e a equação (1). Na figura consegue-se concluir que existe uma boa aproximação entre as duas curvas.

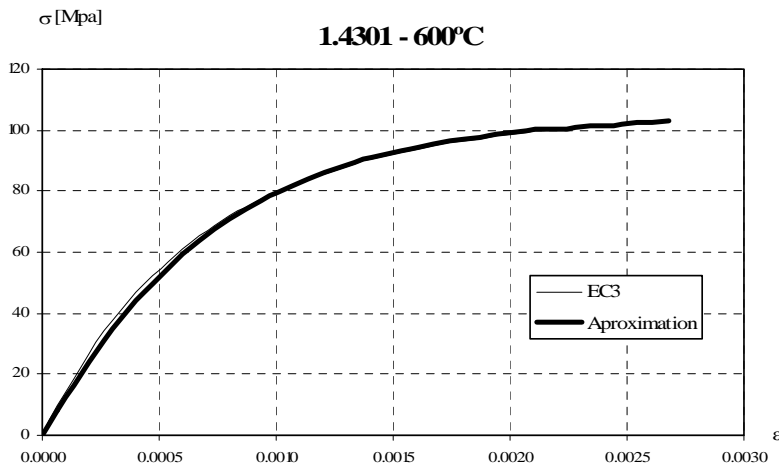


Figura 3. Primeiro tramo da lei constitutiva do aço inoxidável 1.4301: comparação entre a aproximação implementada e o EC3 (EN 1993-1-2) a 600 °C.

## 2.2 Introdução de tensões residuais em elementos finitos de casca

Para a introdução da possibilidade de tomar em consideração tensões residuais é necessário primeiro transformá-las em extensões residuais e adicioná-las de seguida às outras extensões iniciais [7].

Devido a este procedimento, para materiais não elásticos, como é o caso do aço inoxidável, as extensões residuais, correspondendo às tensões residuais (com ilustra a figura 4) devem ser avaliadas de acordo com:

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_{res}^{el} + \varepsilon_{res}^{pl} = \frac{\sigma_{res}}{E_0} + \varepsilon_{res}^{pl} \quad (3)$$

O procedimento é trivial em materiais que têm uma fase elástica linear inicial desde que as tensões residuais estejam sempre nesta fase elástica.

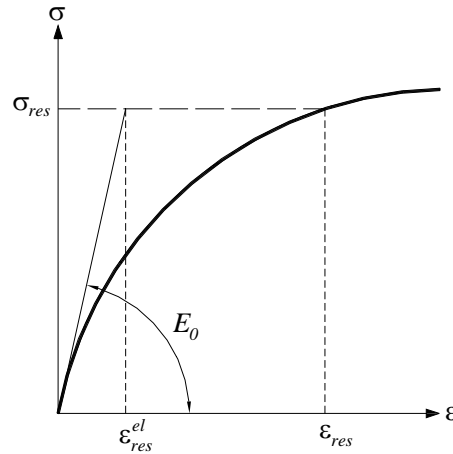


Figura 4. Consideração de extensões residuais em leis constitutivas não lineares.

Em materiais não lineares, o procedimento adoptado inicia-se com a determinação da “tensão de comparação” de von Mises (ver equação 4) das tensões residuais introduzidas.

$$\sigma_{c,res} = \sqrt{\sigma_{x,res}^2 - \sigma_{x,res} \cdot \sigma_{y,res} + \sigma_{y,res}^2 + 3 \cdot \tau_{xy,res}^2} \quad (4)$$

Com esta “tensão de comparação” e com a lei constitutiva descrita na secção 2.1 é possível, utilizando um processo iterativo, determinar uma “extensão de comparação” residual. Neste trabalho foi utilizado o método de Newton-Raphson.

Com a extensão residual de comparação e com a tensão residual de comparação é possível determinar um módulo secante  $E_{sec} = \frac{\sigma_{c,res}}{\epsilon_{c,res}}$ . Este módulo é usado na matriz de elasticidade

[D] necessária para determinação das extensões residuais.

$$\{\epsilon_{res}\} = [D]^{-1} \cdot \{\sigma_{res}\} \quad (5)$$

Um procedimento similar, para materiais não elásticos, é usado no pacote de elementos finitos ABAQUS, onde as extensões plásticas que correspondem às tensões residuais são introduzidas por meio de sub-rotinas especiais [9].

### 3. VALIDAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

Os resultados obtidos dos desenvolvimentos introduzidos nos elementos finitos de casca do programa SAFIR são comparados nesta secção com os resultados obtidos com o elemento finito de viga 3D do mesmo programa, com o elemento finito de viga 3D do programa comercial ANSYS e com alguns testes experimentais feitos por Ala-Outinen et al [10].

As comparações são feitas para elementos com secções de classe 1. A encurvadura por compressão de uma secção oca quadrada e a encurvadura lateral de uma secção em I são analisadas com elementos finitos de casca e de viga.

### 3.1 Encurvadura por compressão de secções ocas quadradas de classe 1 em aço inoxidável

Para verificar as modificações introduzidas, a mesma secção oca SHS40x40x4 de classe 1 utilizada na referência [10] em testes experimentais em colunas de aço inoxidável em caso de incêndio foi utilizada neste estudo. A curvatura dos cantos não foi considerada na malha de elementos finitos utilizada para discretizar a secção transversal.

Foi considerada uma imperfeição geométrica lateral, de acordo com a tolerância permitida em EN 1090 [19] dada pela seguinte expressão:

$$y(x) = \frac{l}{1000} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (6)$$

onde  $l$  é o comprimento da coluna. A figura 5 mostra a forma da deformada da coluna imediatamente antes do colapso.

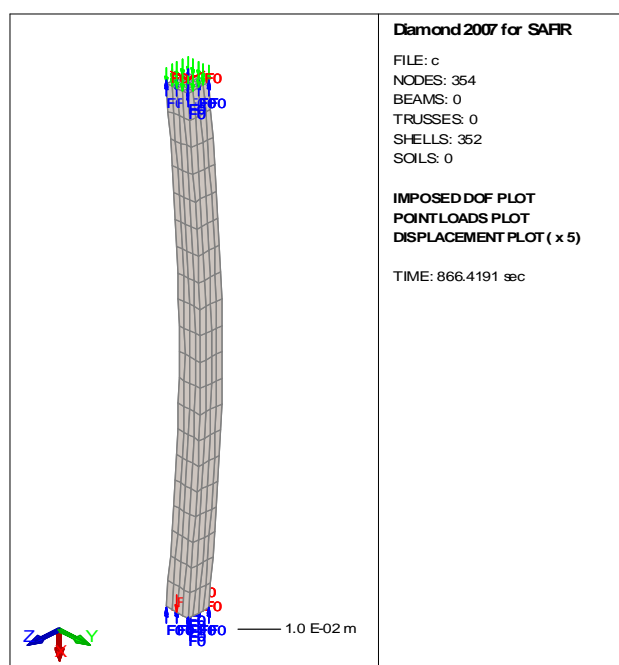


Figura 5. Coluna SHS40x40x4 simulada com elementos finitos de casca.

Não foram introduzidas tensões residuais nestas primeiras simulações. As tensões de cedência e última consideradas foram 210 MPa e 520 MPa respectivamente. Não se considerou o aumento da tensão de cedência nos cantos, devido a conformação a frio [12]. As comparações foram feitas com temperatura uniforme na secção transversal.

A figura 6 mostra os resultados obtidos para 500 °C utilizando o elemento finito de viga do SAFIR e do ANSYS. Estes resultados são comparados com os métodos de dimensionamento simplificados do Eurocódigo 3 (denominado no gráfico de “EN 1993-1-2”).

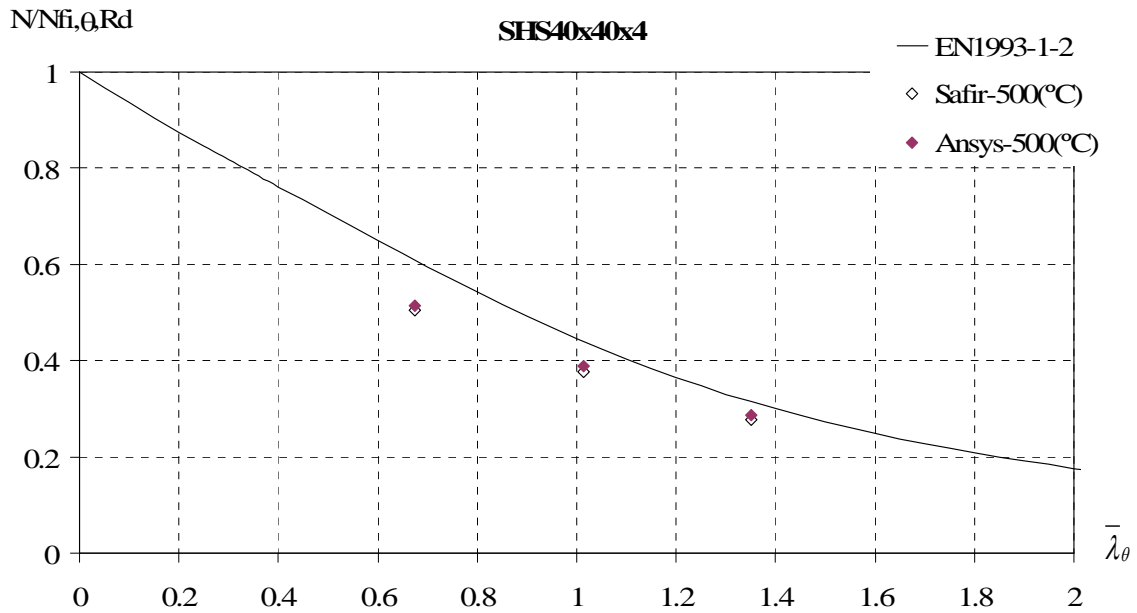


Figura 6. Resultados numéricos de colunas SHS40x40x4 simuladas com elementos finitos de viga 3D.

Com o intuito de comparar os resultados numéricos com os testes experimentais feitos por Ala-Outinen et al [10], as tensões de cedência e última, medidas nos testes, de 595 MPa e de 736 MPa respectivamente, foram utilizadas nos resultados apresentados na figura 7. O nível da carga, o comprimento e as condições de suporte das simulações numéricas correspondem às mesmas utilizadas nos testes experimentais. Na figura 7, “Outinen tests” refere-se aos testes experimentais, “Outinen tests SAFIR B” são as simulações dos testes experimentais com elementos finitos de viga e “Outinen tests SAFIR S” são as simulações dos testes experimentais com elementos de casca.

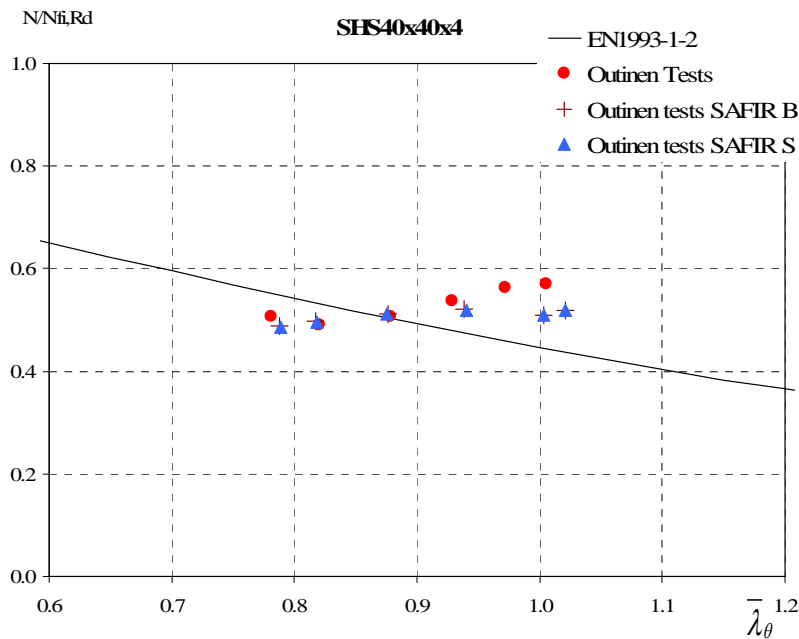


Figura 7. Resultados numéricos do SAFIR de colunas SHS40x40x4 simuladas com elementos finitos de viga e de casca, comparados com resultados experimentais.

Os resultados mostrados na figura 7 foram obtidos para diferentes temperaturas entre 500 e 900 °C.

Das figuras 6 e 7 pode-se concluir que a aproximação usada para a lei de endurecimento do aço inoxidável implementada no SAFIR fornece boas aproximações quando comparada com resultados de outros programas e resultados experimentais.

Um segundo estudo com as colunas SHS40x40x4 foi realizado, para avaliar a influência das tensões residuais.

As tensões residuais adoptadas foram consideradas como constante na espessura dos membros internos da secção. Para a secção oca quadrada, as tensões utilizadas foram as ilustradas na figura 8 [13].

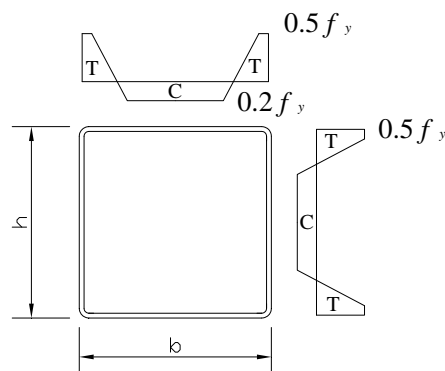


Figura 8. Tensões residuais em secções ocas [13]: C – compressão; T – tracção.

Adoptando a mesma metodologia usada por Gardner e Nethercot [14], antes da aplicação do carregamento externo, um passo preliminar foi realizado, para permitir o equilíbrio das tensões residuais.

A tabela 2 compara os resultados obtidos com elementos de viga, elementos de casca e as fórmulas simples do Eurocódigo 3.

		Sem tensões residuais	Com tensões residuais	Com/sem tensões residuais	EN 1993-1-2
L=2m	El. viga	23.1 kN	22.8 kN	0.99	26.9 kN
	El. casca	22.9 kN	22.7 kN	0.99	
L=3m	El. viga	13.4 kN	12.6 kN	0.94	14.8 kN
	El. casca	13.1 kN	12.7 kN	0.97	

Tabela 2. Resultados para a secção oca

Da tabela 2 pode-se concluir que o Eurocódigo 3 não está no lado da segurança quando comparado com as simulações numéricas. É igualmente possível concluir que as tensões residuais têm pouca influência na capacidade de carga final, de acordo com conclusões de outros autores [9][14].

### 3.2 Encurvadura lateral de uma secção em I soldada de Classe 1

Nesta secção é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos utilizando a lei constitutiva a 2D em elementos de casca com os resultados obtidos utilizando elementos de viga 3D, com e sem tensões residuais.

Foi utilizada uma viga simplesmente apoiada sujeita a momento flector uniforme com uma secção transversal soldada equivalente a um IPE 220 de classe 1, (ver figura 9). Nas simulações numéricas, uma imperfeição geométrica lateral dada pela expressão (6) foi considerada. As tensões de cedência e última foram 210 MPa e 520 MPa respectivamente. As comparações foram feitas considerando uma temperatura uniforme de 600 °C na secção transversal.

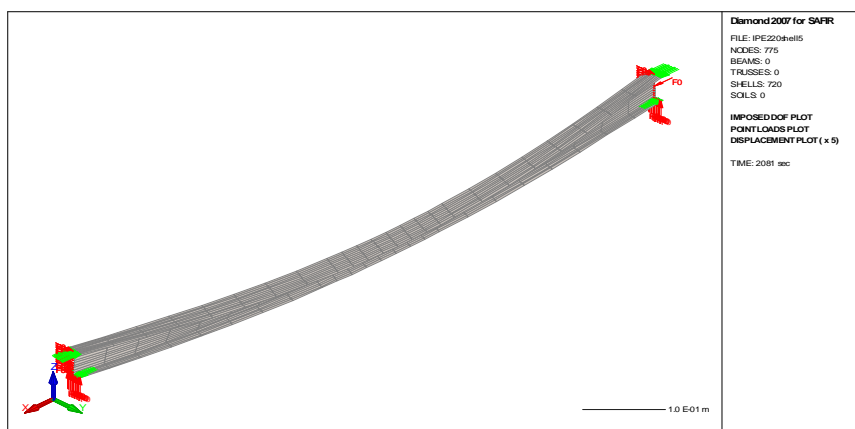


Figura 9. Viga simplesmente apoiada sujeita a flexão uniforme.

As tensões residuais adoptadas são consideradas como constantes na espessura da alma e banzo. Para a secção soldada IPE foi utilizada a distribuição que se apresenta na figura 10, com valor máximo de  $f_y$  (tensão de cedência) [15].

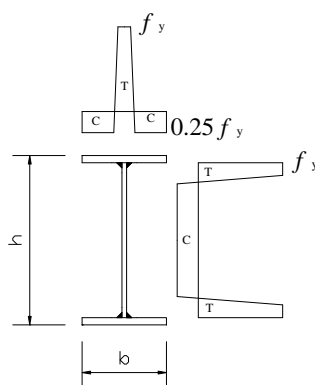


Figura 10. Tensões residuais em secções soldadas IPE: C – compressão; T – tracção.

Da tabela 3 pode-se mais uma vez concluir que a introdução das tensões residuais em elementos de casca, fornece resultados que estão de acordo com os resultados obtidos com os elementos de viga 3D. Mais uma vez a influência das tensões residuais na capacidade de carga final é pequena.

		Sem tensões residuais	Com tensões residuais	Com/sem tensões residuais	EN 1993-1-2
L=3m	El. viga 3D	20.6 kNm	19.9 kNm	0.97	20.3 kNm
	El. casca	19.3 kNm	19.2 kNm	0.99	
L=5m	El. viga 3D	15.7 kNm	15.0 kNm	0.96	14.1 kNm
	El. casca	14.3 kNm	14.0 kNm	0.98	

Tabela 3. Resultados para a secção em I

## 4 INFLUÊNCIA DAS TENSÕES RESIDUAIS EM SECÇÕES DE CLASSE 4 EM AÇO INOXIDÁVEL

Nesta secção, dois exemplos representativos de aplicações de elementos metálicos de paredes finas são apresentados. O primeiro é uma secção oca quadrada axialmente carregada e o segundo é uma viga em I, ambos com secção transversal da classe 4.

### 4.1 Tensões residuais em secções quadradas ocas de Classe 4

Com o objectivo de estudar a influência das tensões residuais em secções de paredes finas axialmente carregadas, um estudo numérico em duas secções ocas quadradas de classe 4 é apresentado nesta secção. Neste estudo o valor das imperfeições foi  $b/200$  para as imperfeições locais [16] e  $1/1000$  para as imperfeições globais [11], valores tipicamente usados no estudo de elementos estruturais de paredes finas [17], e prescritos na parte 1.5 do Eurocódigo 3 [16].

Os resultados numéricos foram obtidos para colunas com as secções quadradas ocas SHS150x150x3 e SHS200x200x5 em classe de aço inoxidável 1.4301. As tensões de cedência e última consideradas foram 210 MPa e 520 MPa respectivamente. As comparações foram feitas com temperatura uniforme na secção transversal de 600 °C. As colunas testadas tiveram comprimentos de 0.9 m com extremidades fixas e foram sujeitas a compressão axial (ver figura 11). Este comprimento foi escolhido de forma a que o colapso se desse por encurvadura local em vez de global. Nestes testes numéricos foi considerada a curvatura dos cantos.

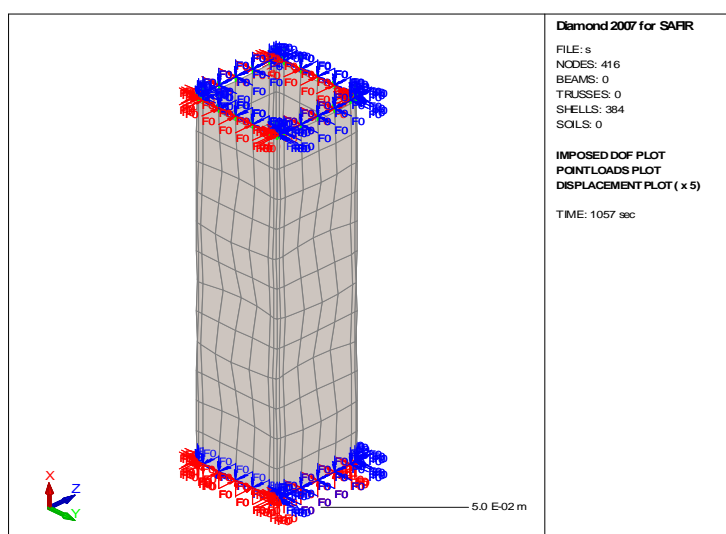


Figura 11. Coluna com uma secção oca de paredes esbeltas em aço inoxidável.

Para as colunas testadas sem tensões residuais consideraram-se as seguintes possibilidades:

- a) sem imperfeições geométricas e sem tensão de cedência mais elevada nos cantos resultante de conformação a frio;
- b) sem imperfeições geométricas e com tensão de cedência mais elevada nos cantos

- resultante de conformação a frio de acordo com Ashraf et al [12];
- c) com imperfeições globais dadas pela expressão (6) e com tensão de cedência mais elevada nos cantos;
  - d) com imperfeições locais com um valor máximo de  $b/200$  [16] e com tensão de cedência mais elevada nos cantos;
  - e) com imperfeições globais dadas pela expressão (6), imperfeições locais com um valor máximo de  $b/200$  e com tensão de cedência mais elevada nos cantos;

A tabela 4 mostra os resultados numéricos correspondentes a estes cinco casos analisados.

Caso	SHS150x150x3	SHS200x200x5
a)	160.5 kN	423.8 kN
b)	175.5 kN	473.6 kN
c)	174.5 kN	465.6 kN
d)	149.5 kN	387.9 kN
e)	149.5 kN	387.9 kN

Tabela 4. Esforço axial decompressão último sem tensões residuais.

A tabela 4 mostra que não é necessário considerar nenhuma imperfeição global, quando a encurvadura local é o modo de colapso principal. Consequentemente, nos resultados apresentados na tabela 5, as tensões residuais foram introduzidas somente no caso d).

Para a secção oca quadrada, a distribuição apresentada na figura 8 [13] foi utilizada.

A tabela 5 apresenta os resultados obtidos para colunas com imperfeições locais, com e sem tensões residuais.

	SHS150x150x3	SHS200x200x5
Sem tensões residuais	149.5 kN	387.9 kN
Com tensões residuais	139.5 kN	376.5 kN
Com/sem tensões residuais	0.93	0.97
EN 1993-1-2	136.9 kN	356.8 kN

Tabela 5. Esforço axial de compressão último com imperfeições locais.

Destes resultados pode-se concluir que a influência das tensões residuais é pequena. No entanto esta influência é do mesmo valor do observado na tabela 2 para uma secção de classe 1. Os resultados do EC3 fornecem boas aproximações aos resultados numéricos.

#### 4.2 Tensões residuais em secções de Classe 4 sujeitas a flexão

Com o objectivo de obter uma forma para as imperfeições locais, foi realizada uma análise modal com o programa CUFISM [18], considerando que a viga se encontrava submetida a um diagrama de tensões normais correspondente a flexão. Este programa foi desenvolvido por Schafer [18] para a determinação dos modos de encurvadura elásticos de elementos estruturais de paredes esbeltas.

O programa CUFISM utiliza o método de faixas finitas [19]. Quando uma secção transversal é definida com uma distribuição de tensões, o programa faz a análise modal de diferentes

comprimentos para o elemento. A tensão e a forma de cada modo de encurvadura são registados para cada um dos comprimentos [20].

A figura 12 apresenta o primeiro modo de encurvadura da secção transversal estudada. Esta primeira forma do modo de encurvadura foi utilizada para a forma das imperfeições locais iniciais, com o máximo de  $b/200$  (sendo  $b$  a altura da alma).

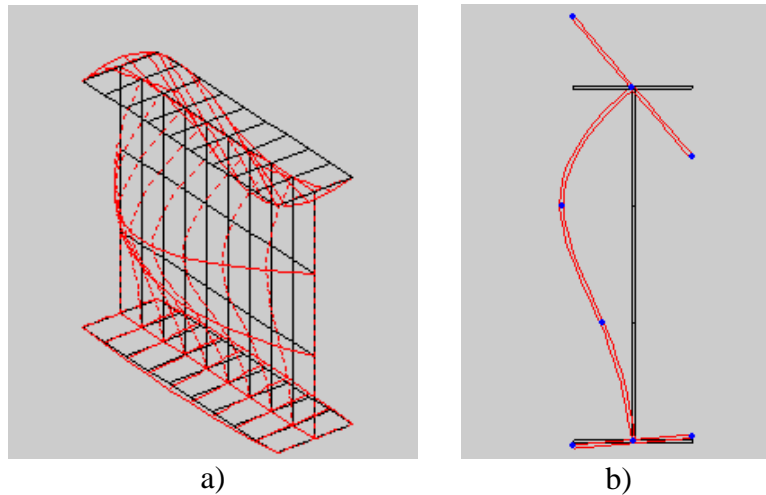


Figura 12. Primeiro modo de encurvadura obtido com o programa CUFSM [16].

São apresentados os resultados numéricos obtidos para vigas com as secções em I 900x300x9 (altura x largura x espessura) e 800x250x8 da classe de aço inoxidável 1.4301. As tensões de cedência e última consideradas foram 210 MPa e 520 MPa respectivamente. As comparações foram efectuadas com temperatura uniforme na secção transversal de 600°C para vigas simplesmente apoiadas com 2.0 m do comprimento, com apoios de forquilha e sujeitos a flexão uniforme. A figura 13 apresenta a deformada da viga imediatamente antes do colapso. O comprimento adoptado foi escolhido de modo que o colapso se desse por encurvadura local em vez de por encurvadura global.

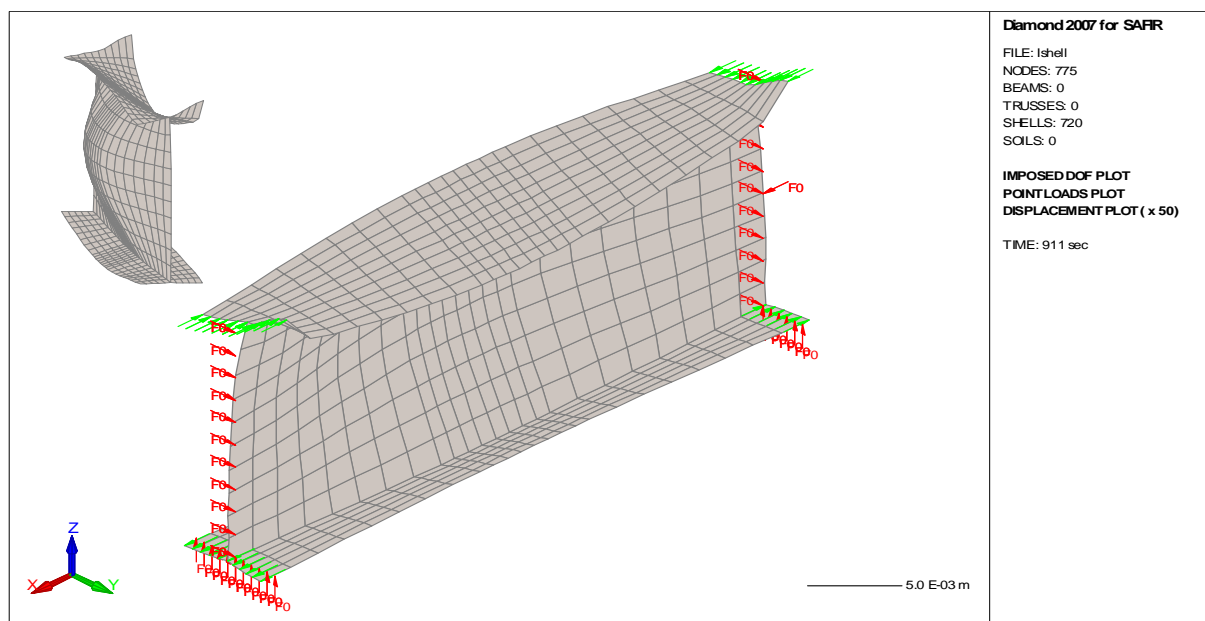


Figura 13. Viga em aço inoxidável analisada com elementos de casca.

Para as vigas testadas sem tensões residuais consideraram-se as seguintes possibilidades:

- sem imperfeições geométricas;
- com apenas imperfeições globais dadas pela expressão (6);
- com apenas imperfeições locais com um valor máximo de  $b/200$ ;
- com imperfeições globais dadas pela expressão (6) e imperfeições locais com um valor máximo de  $b/200$ ;

Caso	I 900x300x9	I 800x250x8
a)	251 kNm	169 kNm
b)	249 kNm	167 kNm
c)	227 kNm	156 kNm
d)	226 kNm	156 kNm

Tabela 6. Momento último sem tensões residuais.

Da tabela 6 pode-se concluir que não é necessário considerar imperfeições globais, devido ao facto de o colapso ocorrer por encurvadura local.

Neste estudo foi utilizada a distribuição de tensões residuais apresentada na figura 10 [13]. Foram apenas consideradas tensões residuais com a direcção longitudinal da viga ( $\sigma_{x,res}$ ).

Antes da aplicação do carregamento externo, um primeiro passo foi executado para permitir o equilíbrio das tensões residuais. A figura 14 apresenta as forças normais resultantes da introdução das tensões residuais antes da aplicação do carregamento externo e as correspondentes direcções das tensões principais.

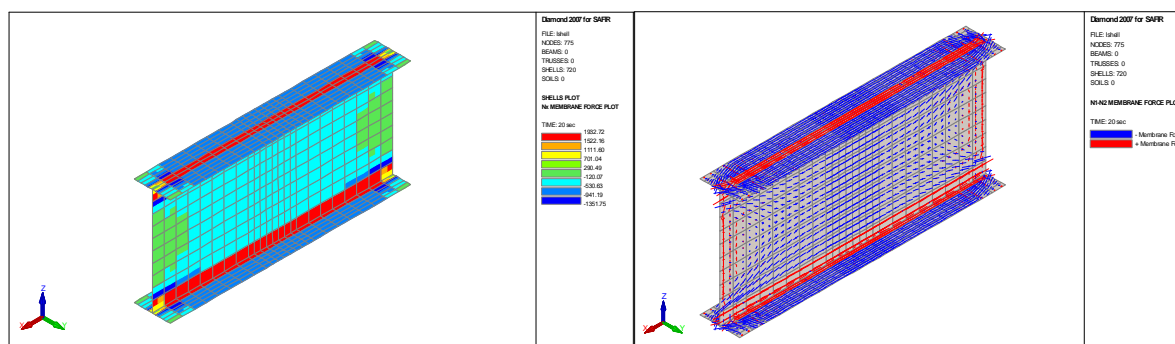


Figura 14. a) forças normais resultantes das tensões residuais; b) direcções das tensões principais.

As tabelas 7 e 8 apresentam os resultados obtidos para as vigas com imperfeições globais e imperfeições locais respectivamente, considerando ou não tensões residuais.

	I 900x300x9	I 800x250x8
Sem tensões residuais	249 kNm	167 kNm
Com tensões residuais	244 kNm	165 kNm
Com/sem tensões residuais	0.98	0.99
EN 1993-1-2	255 kNm	165 kNm

Tabela 7. Momento último com apenas imperfeições globais.

	I 900x300x9	I 800x250x8
Sem tensões residuais	227 kNm	156 kNm
Com tensões residuais	230 kNm	158 kNm
Com/sem tensões residuais	1.01	1.01
EN 1993-1-2	255 kNm	165 kNm

Tabela 8. Momento último com apenas imperfeições locais.

Paradoxalmente, da tabela 8 concluiu-se que a inclusão das tensões residuais traduz-se num efeito benéfico na capacidade de carga final. As mesmas conclusões foram observadas em [9]. Destes resultados pode-se concluir que as tensões residuais têm pouca influência nos elementos estruturais de paredes finas estudados. Da comparação com o EC3 pode-se concluir que este não fornece aproximações seguras aos resultados numéricos.

## 5. CONCLUSÕES

Este artigo mostrou que a aproximação implementada no programa SAFIR para a lei de endurecimento do aço inoxidável a altas temperaturas a ser usada em elementos de casca, fornece bons resultados quando comparada com os resultados obtidos com elementos finitos de viga.

Mostrou-se que a influência das tensões residuais nas capacidades de carga finais de secções de classe 4 em aço inoxidável é pequena. Porém esta influência para as colunas axialmente carregadas estudadas é do mesmo valor da influência observada para uma secção de classe 1,

o que sugere que as tensões residuais devem ser consideradas para a avaliação da capacidade de carga de colunas sujeitas a incêndio. No caso das vigas a influência das tensões residuais pode ser negligenciada.

Este trabalho mostrou igualmente que os resultados do Eurocódigo 3 não estão do lado da segurança para elementos estruturais com secção transversal da classe 4. Mais testes numéricos e experimentais devem ser efectuados para confirmar a natureza insegura do Eurocódigo 3 e para considerar se novas fórmulas para elementos de classe 4 devem ser desenvolvidas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Estrada, I., *Shear Design of Stainless Plate Girders*, PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, (2005).
- [2] Gardner, L., “The use of stainless steel in structures”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, (2005), 7(2), pp. 45–55.
- [3] Euro Inox and Steel Construction Institute, *Design Manual for Structural Stainless Steel*, 3rd edition, (2006).
- [4] European Committee for Standardisation, *EN 1993-1-4 Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1.4. General rules – Supplementary Rules for Stainless Steels*, Brussels, Belgium, (2006).
- [5] European Committee for Standardisation, *EN 1993-1-2 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1.2: General rules - Structural fire design*, Brussels, Belgium, April (2005).
- [6] Franssen, J.-M., “SAFIR. A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire”, *Engineering Journal*, A.I.S.C., (2005), Vol. 42, No. 3, pp. 143-158.
- [7] Franssen, J.-M., “Residual stresses in steel profiles submitted to the fire: an analogy”, *3rd CIB/W14 Workshop “Modelling”*, TNO Building and Construction Research, Rijswijk, The Netherlands, (1993).
- [8] Doneux, C.; Franssen, J.-M., “2D constitutive models for the shell elements of the finite element software SAFIR”, *M&S report*, translation of "Rapport interne - SPEC/97\_01" by C. Doneux, University of Liege, Liege, Belgium, (2003).
- [9] Jandera, M.; Gardner L.; Machaceka, J. “Residual stresses in cold-rolled stainless steel hollow sections”, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier 64 (2008) 1255–1263.
- [10] Ala-Outinen T., Oksanen T., “Stainless steel compression members exposed to fire”, *VTT Research Notes 1864*. Espoo, Finland; (1997)
- [11] European Committee for Standardisation, *EN 1090-2. Execution of Steel and aluminium Structures – Part 2: Technical Requirements for the execution of steel structures*, (2005).
- [12] Ashraf M., Gardner L., Nethercot DA., “Strength enhancement of the corner regions of stainless steel cross sections”, in *Journal of Constructional Steel Research*, (2005), 61(1): 37-52.
- [13] ECCS, *Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames with Rigid Joints*, first

- edition, (1984).
- [14] Gardner, L., Nethercot, D. A, “Numerical Modeling of Stainless Steel Structures Components – A Consistent Approach”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE/October, (2004), pp. 1586-1601.
  - [15] Chen WF, Lui EM., *Stability design of steel frames*, CRC Press, (1991).
  - [16] European Committee for Standardisation, *EN 1993-1-5 Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1.5: Plated structural elements*, Brussels, Belgium, (2006).
  - [17] Uppfeldt, B.; Outinen, T.; Veljkovic, M., “A design model for stainless steel box columns in fire”, *Journal of Constructional Steel Research*, (2008), Vol 64, 11, pp 1294-1301.
  - [18] Schafer BW. *Cold-formed steel behaviour and design: analytical and numerical modeling of elements and members with longitudinal stiffeners*. Ph.D. Dissertation, Cornell Univ., Ithaca, NY, (1997).
  - [19] Cheung YK. *Finite strip method in structural analysis*. New York: Pergamon Press, (1976).
  - [20] A.T. Sarawit, Y. Kim, M.C.M. Bakker, T. Peko, “*The finite element method for thin-walled members-applications*”, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, (2003), vol 41, pp 191–206.