

Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia  
1-3 julho 2019, Guimarães, Portugal  
Universidade do Minho

## COMPORTAMENTO DE PLACAS ESBELTAS DE AÇO INOXIDÁVEL A TEMPERATURAS ELEVADAS

F. Arrais<sup>1</sup>, N. Lopes<sup>1</sup>, P. Vila Real<sup>1</sup> e C. Couto<sup>1</sup>

1: RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro  
e-mail: arrais.f@ua.pt

**Palavras-chave:** placas esbeltas, aço inoxidável, fogo, FEM, instabilidade local

**Resumo.** *O aço inoxidável possui várias características desejáveis num material estrutural. Embora inicialmente mais caras do que em aço carbono convencional, as estruturas em aço inoxidável podem ser competitivas. Os aços inoxidáveis austeníticos são geralmente os mais utilizados para aplicações estruturais, mas recentemente tem sido demonstrado algum interesse no uso de aços ferríticos e austeníticos-ferríticos (Duplex), devido a vantagens específicas, tais como a muito boa resistência ao desgaste e à corrosão dos duplex e a menor percentagem de níquel nos ferríticos, o que reduz seu preço.*

*Relativamente à resistência estrutural ao fogo, para se ter uma boa compreensão da resistência global dos elementos estruturais é importante analisar a resistência da secção transversal, que é diretamente afetada pela ocorrência de instabilidades locais nas placas esbeltas que compõe a secção.*

*Assim, este trabalho apresenta um estudo numérico sobre o comportamento de placas isoladas a temperaturas elevadas, correspondendo à alma (elemento interno) e banzos (elementos salientes) de secções I, comparando as capacidades de suporte de carga últimas obtidas numericamente com as obtidas através de fórmulas de cálculo (como as propostas pelo método das larguras efetivas do Eurocódigo 3). São analisados, com o programa de elementos finitos SAFIR, elementos salientes sujeitos à compressão e elementos internos sujeitos à compressão ou à flexão.*

*Dado que as diferentes classes de aço inoxidável dos grupos austenítico, ferrítico e duplex exibem diferentes reduções da resistência mecânica a temperaturas elevadas, o foco deste estudo será a influência da classe de aço inoxidável nas previsões da resistência última de placas esbeltas.*

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação do aço inoxidável como material estrutural tem vindo a aumentar, devido a diferentes qualidades como sua alta durabilidade, resistência à corrosão e aparência estética [1,2]. Apesar de um elevado custo inicial, o aço inoxidável pode ser um material competitivo se for considerada a análise de custo do ciclo de vida, devido à baixa necessidade de manutenção exigida. Além desta característica, possui uma maior resistência ao fogo quando comparado com o aço carbono [3], permitindo em alguns casos a ausência de proteção ao fogo destes materiais.

Os austeníticos são geralmente os grupos mais utilizados para aplicações estruturais, mas recentemente tem-se demonstrado algum interesse em aumentar a aplicação de aços ferríticos e austeníticos-ferríticos (Duplex) para fins estruturais devido a vantagens específicas. O ferrítico apresenta a vantagem de ter menos percentagem de níquel na sua composição química, diminuindo desta forma o seu custo inicial, mas mantendo a sua resistência quer à corrosão quer estrutural. O Duplex apresenta uma boa resistência de suporte de cargas mas também uma elevada resistência à corrosão e ao desgaste.

Para ter uma melhor compreensão da resistência final de elementos estruturais, é importante analisar antes de mais a resistência da secção transversal, diretamente afetada pela ocorrência de fenómenos de instabilidade local.

Para fins de dimensionamento, o Eurocódigo 3 (EC3) [4] considera que a esbelteza das placas determina a classificação da secção transversal (de Classe 1 - secções compactas à Classe 4 - secções esbeltas). Assim, a resistência da secção transversal é calculada considerando as propriedades plásticas da secção para as secções das Classes 1 e 2, propriedades elásticas para secções da Classe 3 e propriedades efetivas da secção, aplicando o método das larguras efetivas, para as secções da Classe 4. Além disso, para secções transversais das Classes 1, 2 e 3 a temperaturas elevadas, a tensão correspondente a uma extensão total de 2% deve ser considerada como tensão de cedência e para as secções transversais da Classe 4 a tensão de cedência do aço deverá ser considerada igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% [3].

Apesar de a encurvadura local a temperaturas elevadas ter sido estudada por diferentes autores [5-10], os trabalhos mencionados abordam apenas elementos em aço carbono. Os estudos do efeito da encurvadura local em secções em aço inoxidável a temperaturas elevadas são escassos e focam-se principalmente no comportamento do elemento.

De acordo com a Parte 1-2 do EC3 [3], as relações tensão-extensão do aço inoxidável a temperaturas elevadas são caracterizadas por terem um comportamento sempre não linear com uma longa fase de endurecimento. Como na Parte 1-2 do EC3 as regras de cálculo ao fogo existentes para o aço inoxidável são baseadas nas formulações desenvolvidas para elementos em aço carbono [11,12], mesmo tendo comportamentos materiais diferentes, é ainda necessário desenvolver o conhecimento sobre o comportamento estrutural do aço inoxidável ao fogo.

Este trabalho tem como principal objetivo analisar a validade das propostas de cálculo do EC3 para o cálculo das áreas efetivas de secções transversais de aço inoxidável em situação de incêndio, por meio de análises geométrica e materialmente não lineares com

imperfeições, aplicando o programa de elementos finitos SAFIR [13]. O comportamento das placas, que compõem as secções, a temperaturas elevadas é analisado considerando-se compressão ou flexão e diferentes condições fronteira para modelação de elementos salientes (banzos) e elementos internos (almas), seguindo a metodologia utilizada para o desenvolvimento de abordagens de cálculo para aço carbono [5,7,12].

Visto que de acordo com o EC3 [3], diferentes classes de aço inoxidável apresentam diferentes leis constitutivas a temperaturas elevadas, neste estudo paramétrico são consideradas as seguintes classes: i) 1.4301 (austenítico); ii) 1.4003 (ferrítico); iii) 1.4462 (duplex).

Posteriormente são feitas comparações entre os resultados numéricos, os métodos de cálculo do EC3 e uma proposta recente para secções de aço carbono da Classe 4 [6], concluindo-se que novas expressões de dimensionamento devem ser desenvolvidas para a aplicação do método das larguras efetivas em secções transversais de aço inoxidável ao fogo.

## 2. METODOLOGIAS DE CÁLCULO SIMPLIFICADAS

### 2.1. Eurocódigo 3

Segundo a Parte 1-2 do EC3 [3], a resistência da secção de um elemento em aço inoxidável ao fogo é calculada através do mesmo procedimento que para o aço carbono, alterando apenas as propriedades mecânicas do material para consideração das temperaturas elevadas na secção.

Relativamente à classificação da secção transversal, a Eq. (1) foi usada para calcular o parâmetro  $\varepsilon$ , necessário para a determinação dos limites de classificação do EC3 [14]

$$\varepsilon_{\theta} = 0.85 \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0.5} \quad (1)$$

O valor de resistência de cálculo de elementos axialmente comprimidos de secções de Classe 1, 2 ou 3 com uma temperatura uniforme deve ser determinado a partir da Eq. (2).

$$N_{fi,t,Rd} = A f_{y,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (2)$$

Para secções da Classe 4, de acordo com o anexo E da Parte 1-2 do EC3, a área efetiva ( $A_{eff}$ ), obtida através da Parte 1-5 do EC3 [12], deve ser considerada em vez da área bruta da secção transversal.

Em situação de incêndio, são aceitáveis maiores deformações quando comparadas com as deformações obtidas à temperatura normal. Desta forma, em vez da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% normalmente utilizada à temperatura normal, para secções das Classes 1, 2 e 3 a temperaturas elevadas, a tensão correspondente a uma extensão total de 2% deve ser adotada como tensão de cedência [3], como se apresenta na Eq. (3).

$$f_{y,\theta} = f_{2\%,\theta} = k_{2\%,\theta} f_y \quad (3)$$

Contudo, para secções transversais da Classe 4, de acordo com o Anexo E da Parte 1-2 do

EC3, deve ser utilizada como tensão de cedência a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, Eq. (4).

$$f_{y,\theta} = f_{0.2p,\theta} = k_{0.2p,\theta} f_y \quad (4)$$

Os fatores de redução da tensão de cedência apresentados encontram-se no Anexo C da Parte 1-2 do EC3 para o aço inoxidável a temperaturas elevadas, para os diferentes tipos de aço inoxidável analisados.

Em vigas, o valor de cálculo do momento resistente de uma secção transversal com temperatura uniforme  $\theta_a$  deve ser determinado pela Eq. (5):

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] M_{c,Rd} \quad (5)$$

Sendo  $M_{c,Rd}$  para as Classes 1 e 2 o momento fletor resistente plástico, para a Classe 3 o momento fletor elástico, e para as secções da Classe 4 o momento fletor resistente efetivo determinado com as propriedades efetivas obtidas a partir da Parte 1-5 do EC3, à temperatura normal.

A área efetiva e o módulo de secção efetivo ( $W_{eff,y}$ ) são determinados através da aplicação do método das larguras efetivas, considerando a redução da resistência devido aos efeitos de encurvadura local [12]. A Parte 1-4 do EC3 [4] fornece equações específicas para a determinação dos fatores de redução ( $\rho$ ) para a largura da placa dos elementos que compõem as secções em aço inoxidável, como apresentado na Eq. (6) e na Tabela 1.

$$b_{eff} = \rho \cdot b \quad (6)$$

Elementos	Fator de redução
Elementos salientes soldados	$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0.242}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$
Elementos internos soldados	$\rho = \frac{0.772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0.125}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$

**Tabela 1.** Fatores de redução para elementos de secções transversais de aço inoxidável [4].

A esbelteza de placas –  $\bar{\lambda}_p$  – é obtida a partir da Eq. (7).

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (7)$$

## 2.2. Proposta para secções de Classe 4 em aço carbono a temperaturas elevadas

Estudos recentes [6,8] conduziram à elaboração de uma proposta que considera a aplicação da tensão correspondente a 2% da extensão total como tensão cedência também para secções transversais de Classe 4 a temperaturas elevadas, com os fatores de redução

das larguras efetivas de placa calculados como apresentado na Tabela 2.

A validade da aplicação desta proposta para secções de aço inoxidável foi também testada no presente trabalho.

Elementos	Fator de redução
Elementos salientes	$\rho = \frac{\left(\bar{\lambda}_p + 1.1 - \frac{0.52}{\varepsilon}\right)^{1.2} - 0.188}{\left(\bar{\lambda}_p + 1.1 - \frac{0.52}{\varepsilon}\right)^{2.4}} \leq 1.0$
Elementos internos	$\rho = \frac{\left(\bar{\lambda}_p + 0.9 - \frac{0.26}{\varepsilon}\right)^{1.5} - 0.055(3 + \psi)}{\left(\bar{\lambda}_p + 0.9 - \frac{0.26}{\varepsilon}\right)^3} \leq 1.0$

**Tabela 2.** Fatores de redução propostos para elementos de secções em aço carbono [6].

### 3. COMPORTAMENTO DE PLACAS

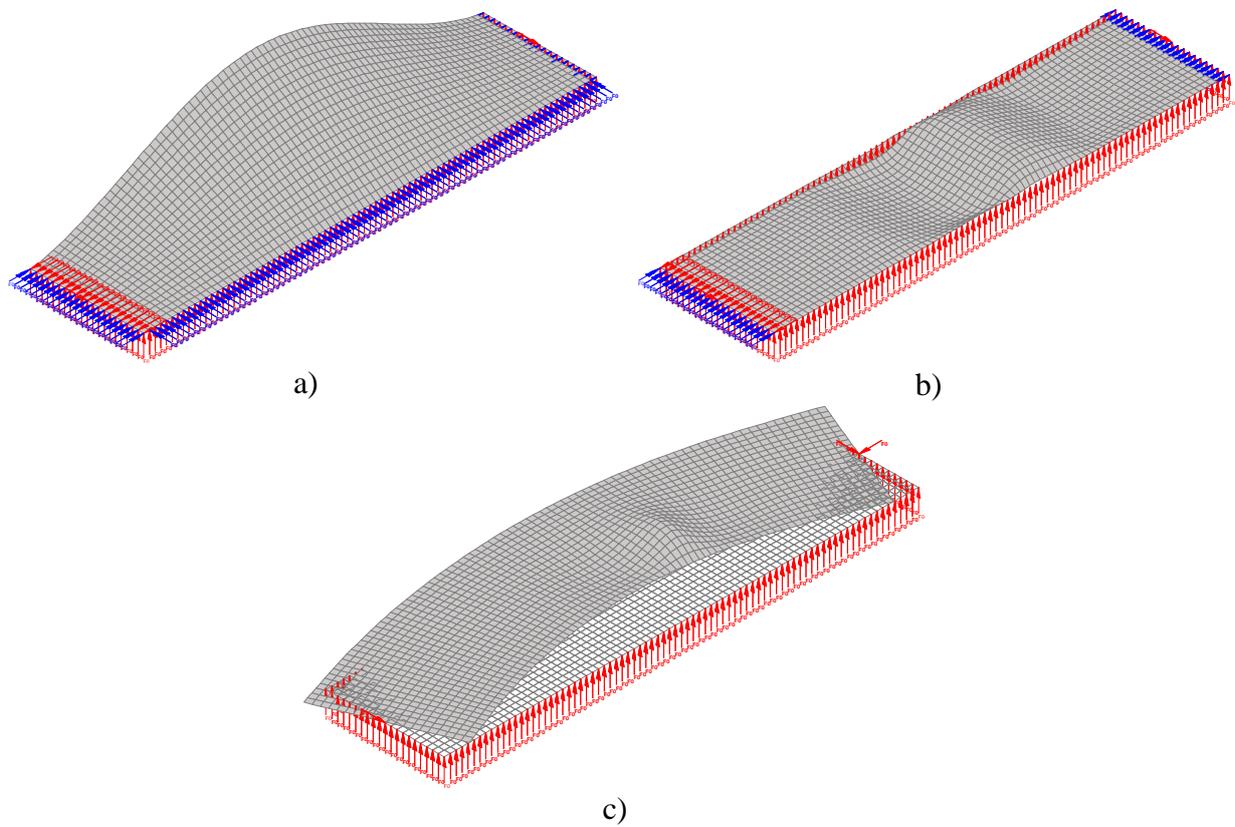
#### 3.1. Modelação numérica

Elementos estruturais compostos por diferentes secções transversais podem apresentar diferentes comportamentos de placas. Por exemplo, em secções em forma de I submetidos a compressão axial têm banzos e almas comprimidos, enquanto que quando esses perfis estão sujeitos a flexão no eixo forte, um banzo está comprimido e a alma é submetida a flexão. As secções retangulares ocas sujeitas à compressão terão apenas elementos internos sujeitos à compressão e, quando submetidas à flexão, terão um elemento interno sujeito à compressão e dois elementos internos sujeitos à flexão.

Para determinar a carga última de placas retangulares, foi utilizado o programa de elementos finitos SAFIR. Utilizaram-se elementos de casca, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações). As condições de apoio de simplesmente apoiado foram aplicadas às placas restringindo os deslocamentos verticais. Adicionalmente, as rotações nas extremidades da placa também foram restringidas para simular a continuidade do banzo-alma. Para os elementos salientes, os deslocamentos verticais foram restringidos em três lados, enquanto que para os elementos internos os deslocamentos verticais foram restringidos em todos os quatro lados, esta metodologia segue os mesmos princípios de Couto et al. [6]. A Figura 1 apresenta as deformadas obtidas para um elemento saliente sujeito a compressão, um elemento interno sujeito a compressão e um elemento interno sujeito a flexão.

Em relação às imperfeições geométricas, estas foram introduzidas no modelo numérico com a forma dos modos de encurvadura obtidos com o programa CAST3M [15] (aplicando a interface RUBY [16]). Para a amplitude considerou-se 80% de  $b/50$  para elementos salientes e 80% de  $b/100$  para os elementos internos, seguindo as recomendações da Parte 1-5 do EC3 [12] e as tolerâncias de fabrico da norma EN 1090-2 [17]. Consideraram-se placas em aço inoxidável da classe 1.4301, 1.4003 e 1.4462 [4]

submetidas às temperaturas uniformes de 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 600°C e 700°C.



**Figura 1:** Deformadas (x5): a) elemento saliente sujeito a compressão; b) elemento interno sujeito a compressão; c) elemento interno sujeito a flexão.

Na Tabela 3 encontram-se os valores nominais da tensão de cedência ( $f_y$ ), da tensão última ( $f_u$ ) e do módulo de elasticidade ( $E$ ) aplicados nos modelos de diferentes tipos de aço inoxidável.

Tipo	Classe	Tensão de cedência $f_y$ (MPa)	Tensão última $f_u$ (MPa)	Módulo de Elasticidade $E$ (GPa)
Austenítico	1.4301	210	520	200
Ferrítico	1.4003	280	450	220
Duplex	1.4462	460	660	200

**Tabela 3.** Valores nominais para os diferentes tipos de aço inoxidável [4].

Estas propriedades mecânicas são reduzidas a temperaturas elevadas conforme apresentado na Figura 2 e 3, variando para cada classe de aço.

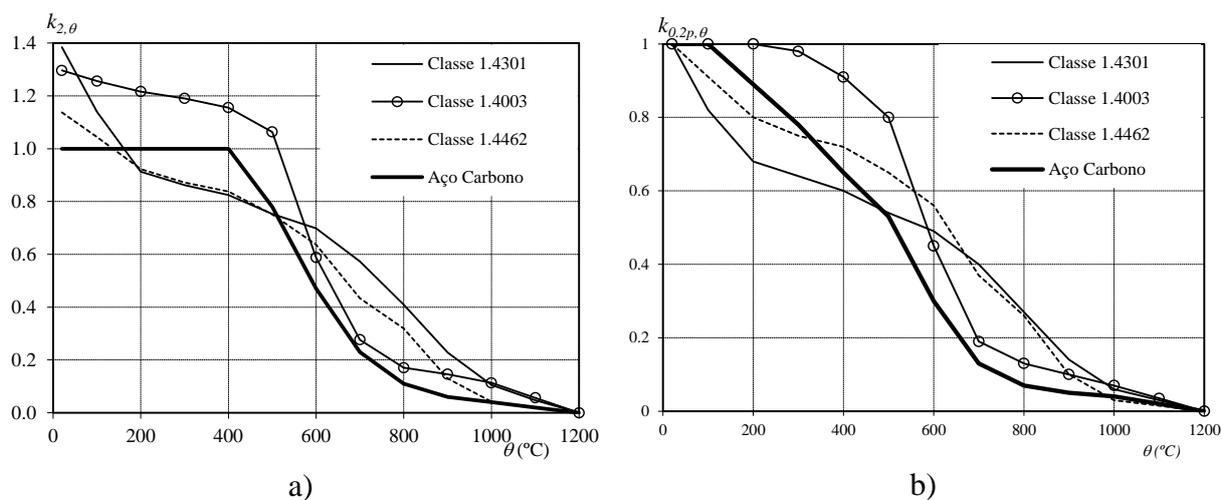


Figura 2. Redução da tensão de cedência a temperaturas elevadas [3].

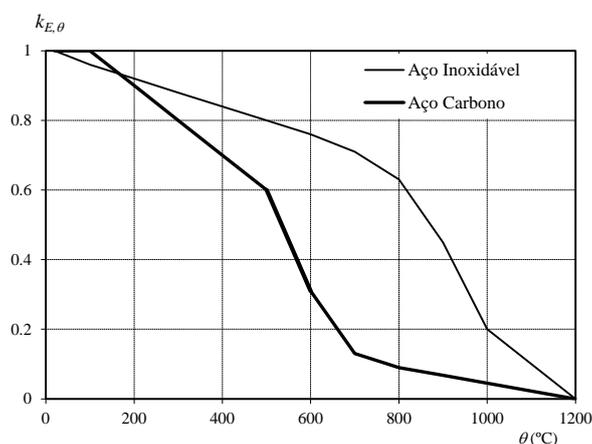


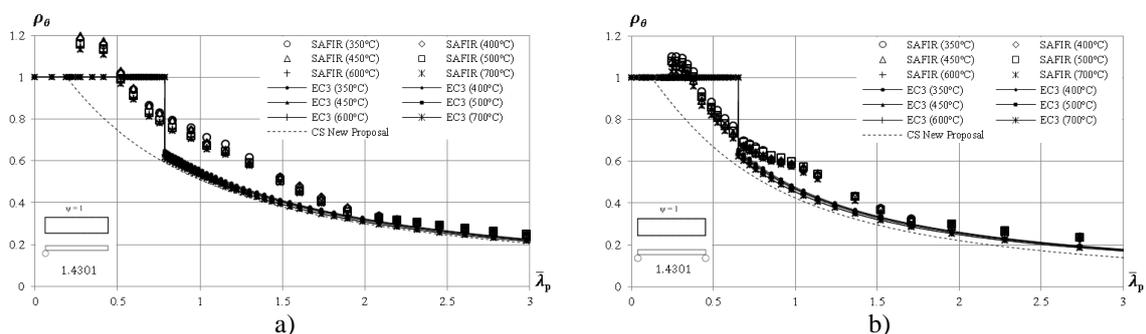
Figura 3. Redução do módulo de elasticidade a temperaturas elevadas [3].

### 3.2. Placas sujeitas à compressão

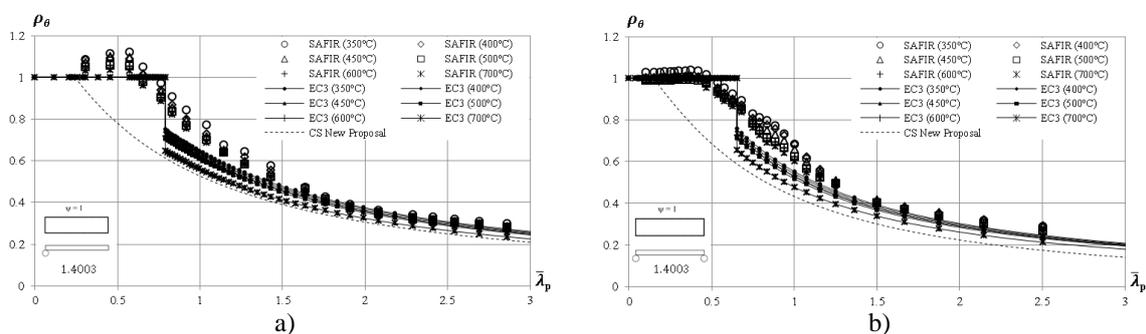
Os resultados obtidos para elementos de placa internos e salientes submetidos a compressão são apresentados nesta secção. A equação para determinação do fator de redução a temperaturas elevadas é adaptada devido à mudança na tensão de cedência das secções de Classe 3 para Classe 4 como apresentado na Eq. (8), provocando uma descontinuidade na curva.

$$\rho_{\theta} = \frac{N_{c,Rd}}{N_{Rd}} = \rho \frac{f_{y,\theta}}{f_{2,\theta}} \quad (8)$$

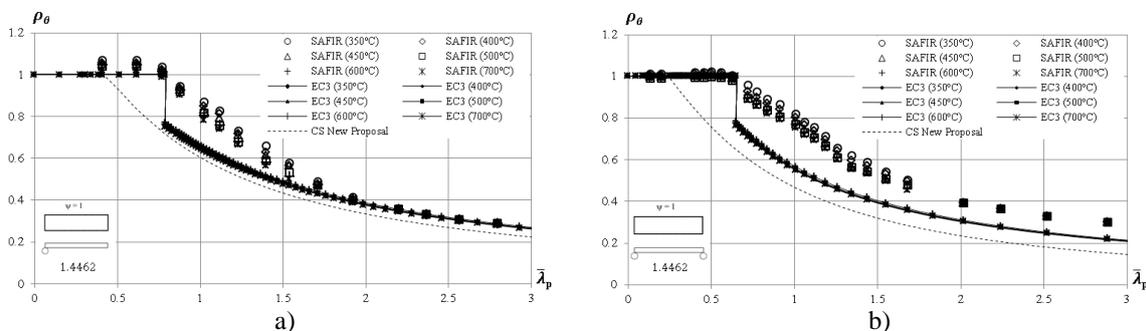
As Figuras 4 à 6 apresentam as comparações entre as capacidades de carga última de elementos de placa internos e salientes sujeitos a compressão, obtidas com o EC3, a nova proposta para elementos de aço carbono de Classe 4 (apresentada como “CS New Proposal” no gráfico) e SAFIR, para diferentes tipos de aço inoxidável.



**Figura 4.** Resultados para elementos a) salientes à compressão e b) internos à compressão para o aço inoxidável austenítico a temperaturas elevadas.



**Figura 5.** Resultados para elementos a) salientes à compressão e b) internos à compressão para o aço inoxidável ferrítico a temperaturas elevadas.

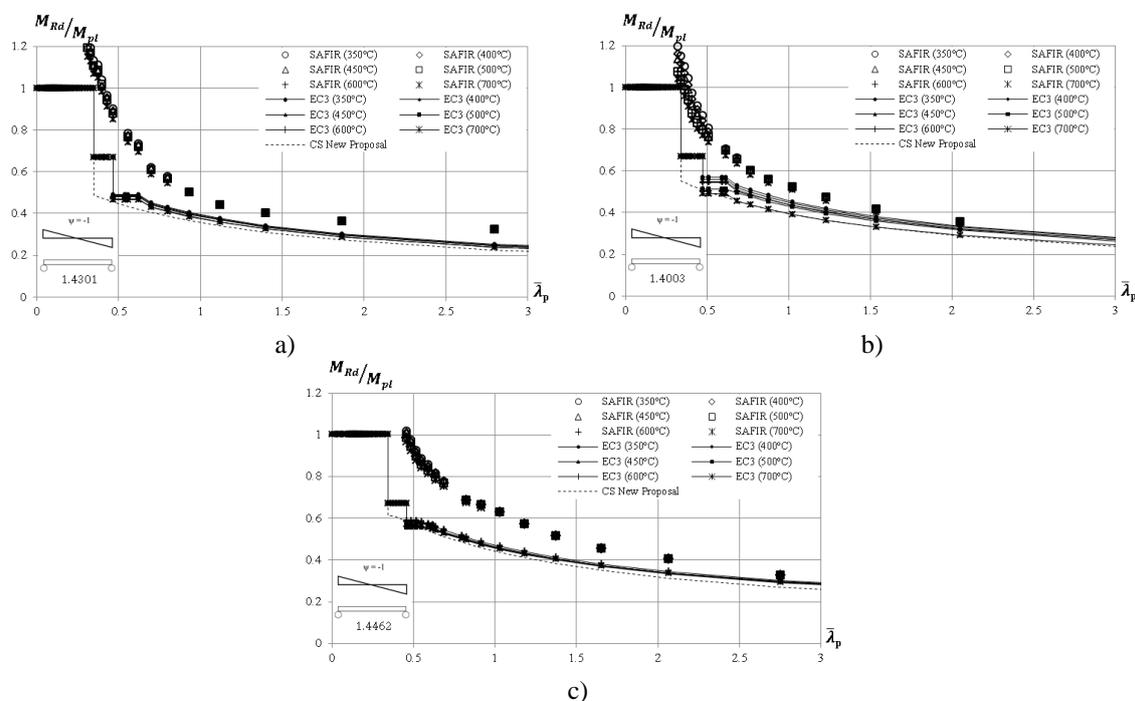


**Figura 6.** Resultados para elementos a) salientes à compressão e b) internos à compressão para o aço inoxidável austenítico-ferrítico (Duplex) a temperaturas elevadas.

Para ambos os elementos, internos e salientes, à compressão, a proposta de secções da Classe 4 em aço carbono [5] elimina a natureza não conservativa provocada pelo patamar do EC3 para o aço inoxidável austenítico (Figura 4) e ferrítico (Figura 5). Os resultados para o aço inoxidável austenítico-ferrítico (Figura 6) demonstraram que as regras de cálculo são demasiado conservativas. No entanto, os resultados realçam a necessidade de desenvolver formulações de cálculo mais específicas desenvolvidas particularmente para placas de aço inoxidável, a temperaturas elevadas, sujeitas à compressão, tendo em conta a classe do aço inoxidável.

### 3.3. Placas sujeitas à flexão

Os resultados obtidos para os elementos internos sujeitos a flexão são apresentados na Figura 7. Os momentos últimos obtidos em cada placa para todos os métodos foram divididos pelos momentos de flexão plásticos.



**Figura 7.** Resultados para elementos internos sujeitos a flexão para o aço inoxidável a) austenítico, b) ferrítico e c) austenítico-ferrítico (Duplex) a temperaturas elevadas.

Na presente figura, os diferentes patamares do EC3 correspondem às transições entre as secções de Classe 2 e Classe 3 (da resistência plástica à elástica) e entre as secções de Classe 3 e Classe 4, onde a temperaturas elevadas a tensão resistente de cálculo muda, como mencionado anteriormente. As curvas de ambas as propostas são conservativas quando comparadas com os resultados numéricos, o que leva a concluir que fórmulas específicas para placas de aço inoxidável devem ser desenvolvidas, como se pode observar particularmente para os resultados do aço inoxidável austenítico-ferrítico.

### 3.4. Análise estatística

O valor médio ( $\mu$ ) e o desvio-padrão ( $s$ ) são valores importantes a serem tidos em conta na análise estatística para as diferentes metodologias de cálculo do EC3 e diferentes Propostas. Para cada classe de aço inoxidável e para cada curva analisada (Figura 8 à 10) é possível avaliar a relação entre o valor analítico e o valor numérico correspondente obtido pelo software SAFIR, Eq. (9). O valor de  $n$  representa o número total de simulações numéricas consideradas.

$$x_i = \frac{R_{ult,i}^{Analytical}}{R_{ult,i}^{SAFIR}} \quad (9)$$

O valor médio ( $\mu$ ) obtém-se pela Eq. (10):

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10)$$

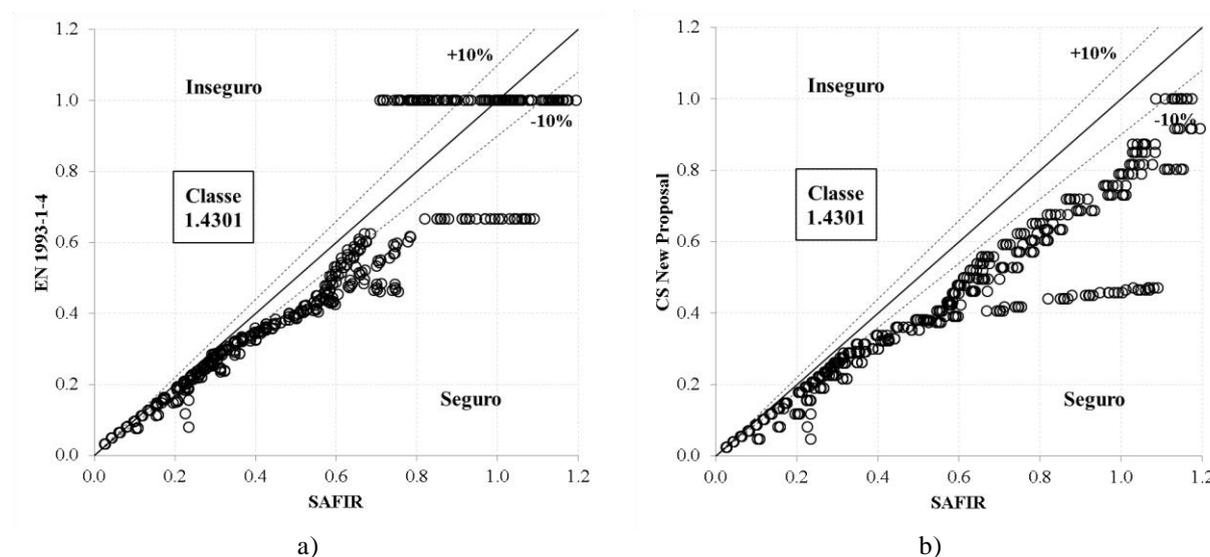
E o desvio-padrão ( $s$ ) pela Eq. (11):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (11)$$

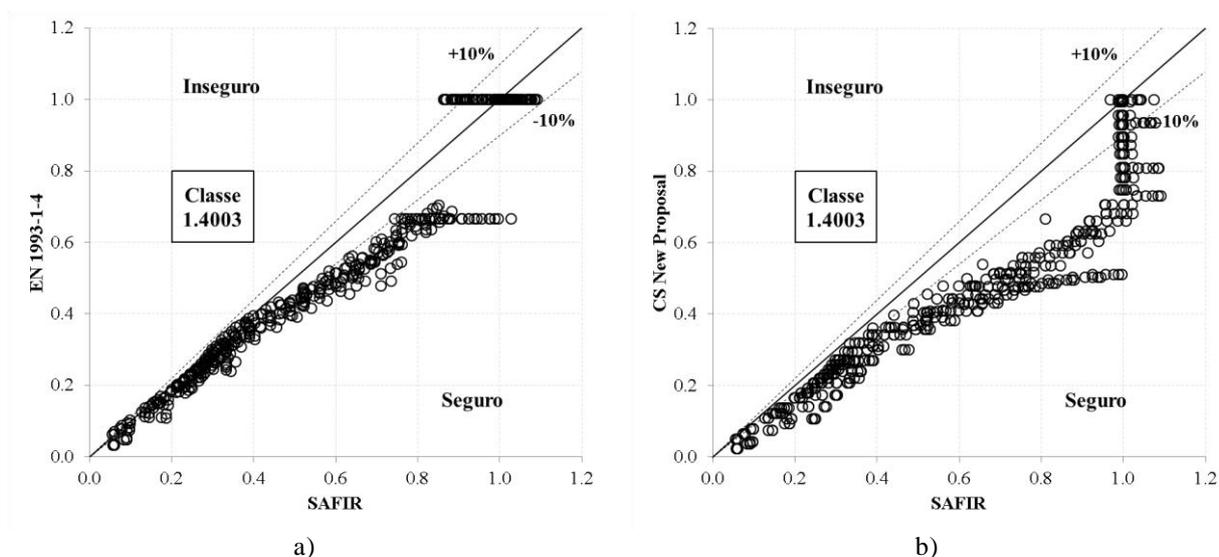
A partir da Tabela 4 e Figura 8 à 10 é possível observar que as diferentes regras de cálculo não estão adaptadas para placas esbeltas de aço inoxidável. Os valores médios baixos e elevados desvios-padrões levam a confirmar que é necessário desenvolver regras de cálculo específicas para placas esbeltas em aço inoxidável. A percentagem de resultados inseguros também é relevante para a consideração destas regras de dimensionamento.

Classe	Metodologia	N.º de simulações ( $n$ )	Valor médio ( $\mu$ )	Desvio-padrão ( $s$ )	% Valores inseguros
1.4301	EN 1993-1-4	437	0.8924	0.1584	15.3%
	CS New Proposal	437	0.7591	0.1782	0.0%
1.4003	EN 1993-1-4	468	0.8956	0.1105	18.4%
	CS New Proposal	468	0.7456	0.1920	1.5%
1.4462	EN 1993-1-4	432	0.8296	0.1346	5.6%
	CS New Proposal	432	0.7605	0.1331	4.2%

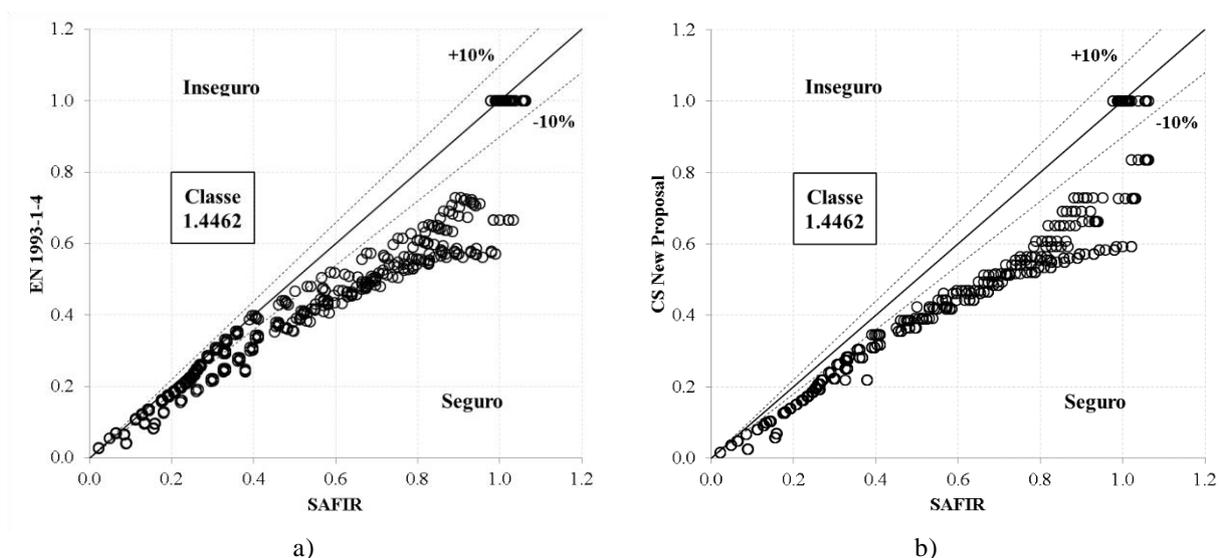
**Tabela 4.** Análise estatística para os diferentes tipos de aço inoxidável a temperaturas elevadas.



**Figura 8.** Comparação entre os resultados numéricos obtidos com o SAFIR, a a) metodologia do EC3 e a b) nova proposta, para o aço inoxidável austenítico a temperaturas elevadas.



**Figura 9.** Comparação entre os resultados numéricos obtidos com o SAFIR, a a) metodologia do EC3 e a b) nova proposta, para o aço inoxidável ferrítico a temperaturas elevadas.



**Figura 10.** Comparação entre os resultados numéricos obtidos com o SAFIR, a a) metodologia do EC3 e a b) nova proposta, para o aço inoxidável austenítico-ferrítico (Duplex) a temperaturas elevadas.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo numérico sobre o comportamento de placas de diferentes classes de aço inoxidável (austenítico, ferrítico e duplex) que constituem as secções transversais de elementos em situação de incêndio.

Com o objetivo de melhor compreender o comportamento dessas secções em aço inoxidável, foram analisadas placas esbeltas a temperaturas elevadas.

Este estudo, relativamente a elementos salientes comprimidos, elementos internos comprimidos e elementos internos sujeitos à flexão, permitiu concluir que o EC3 não

fornece metodologias adequadas e seguras quando comparadas com a capacidade de carga última obtida numericamente.

No seguimento, uma proposta recente para placas de aço carbono [6] também foi estudada. Observou-se que a aplicação desta proposta permitiu superar a insegurança observada anteriormente para as secções de Classe 3, mas os resultados permaneceram muito conservativos para as secções de Classe 4.

Resumindo, a resistência de elementos estruturais em aço inoxidável para o caso de incêndio ainda não está completamente clarificada, motivando desta forma e justificando o desenvolvimento de mais estudos com o objetivo de alcançar formulações mais precisas e seguras para esses elementos.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, POCI-01-0145-FEDER-030655, suportado pelo orçamento do POCI Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) na sua componente FEDER e pelo orçamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

## REFERÊNCIAS

- [1] Leroy Gardner - The use of stainless steel in structures. Progress in Structural Engineering and Materials, vol 7, pp 45-55, 2005.
- [2] Euro Inox, SCI, Steel Construction Institute. 2006. Design Manual for Structural Stainless Steel. 3rd ed.
- [3] CEN European Committee for Standardisation - EN 1993-1-2, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Belgium, 2005.
- [4] CEN European Committee for Standardisation - EN 1993-1-4, Eurocode 3, Design of steel Structures – Part 1-4: General rules – Supplementary Rules for Stainless steels, Belgium, 2006.
- [5] Carlos Couto, Paulo Vila Real, Nuno Lopes, Bin Zhao - Effective width method to account for the local buckling of steel thin plates at elevated temperatures. Thin Walled Structures, 84, 134-149, 2014.
- [6] Carlos Couto, Paulo Vila Real, Nuno Lopes, Bin Zhao - Resistance of steel cross-sections with local buckling at elevated temperatures. Journal of Constructional Steel Research, 109, pp. 101-114, 2015.
- [7] FIDESC4 - Fire Design of Steel Members with Welded or Hot-Rolled Class 4 Cross-Section. RFCS-CT-2011-2014, Technical Report No. 5”, 2014.
- [8] Knobloch, M., & Fontana, M. - Strain-based approach to local buckling of steel sections subjected to fire. Journal of Constructional Steel Research, 62(1-2), 44-67, 2006.
- [9] Quiel, S. E., & Garlock, M. E. M. - Calculating the buckling strength of steel plates exposed to fire. Thin-Walled Structures, 48(9), 684-695, 2010.
- [10] Chrysanthos Maraveas, Thomas Gernay, Jean-Marc Franssen - Amplitude of local imperfections for the analysis of thin-walled steel members at elevated temperatures, Applications of Structural Fire Engineering (ASFE'17), Manchester,

- UK, 2017.
- [11] CEN European Committee for Standardisation - EN 1993-1-1, Eurocode 3, Design of steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, Belgium, 2005.
  - [12] CEN European Committee for Standardisation - EN 1993-1-5, Eurocode 3, Design of steel Structures – Part 1-5: Plated structural elements, Belgium, 2006.
  - [13] Jean-Marc Franssen, Thomas Gernay - Modelling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2017.
  - [14] Jean-Marc Franssen, Paulo Vila Real - *Fire Design of Steel Structures*. ECCS; Ernst & Sohn, a Wiley Company, 2nd edition, 2015.
  - [15] CEA - CAST 3M research FEM environment. development sponsored by the French Atomic Energy Commission <http://www-cast3m.cea.fr/>, 2012.
  - [16] Carlos Couto, Paulo Vila Real, Nuno Lopes - RUBY an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M. University of Aveiro, 2013.
  - [17] CEN European Committee for Standardisation - EN 1090-2, Technical requirements for the execution of steel structures. Belgium, 2011.