

Resistência mecânica de elementos em aço inoxidável a temperaturas elevadas

Stainless steel members strength at elevated temperatures

Nuno Lopes¹ | Flávio Arrais¹ | Paulo Vila Real¹ | Matheus Alves² | Luís Mesquita³ | Paulo Piloto⁴

¹ RISCO, Universidade de Aveiro, Portugal, nuno.lopes@ua.pt, arrais.f@ua.pt, pvreal@ua.pt

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil, matheusa@alunos.utfpr.edu.br

³ ISISE, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, lmesquita@ipb.pt

⁴ LAETA - INEGI, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, ppiloto@ipb.pt

resumo

O presente artigo apresenta um estudo experimental sobre a caracterização mecânica do aço inoxidável austenítico 1.4301, à temperatura normal e a altas temperaturas. As leis constitutivas obtidas por ensaios à tração são comparadas com as preconizadas no Eurocódigo 3 (EC3), cujos respetivos modelos materiais foram recentemente sujeitos a propostas de alteração, necessitando ainda de completa validação. Por fim analisa-se a influência da aplicação das diferentes leis constitutivas na modelação numérica de vigas com secções retangulares ocas (RHS) e na respetiva resistência ao fogo.

Palavras-chave: Resistência mecânica, temperaturas elevadas, aço inoxidável

abstract

This paper presents an experimental study on the mechanical characterization of austenitic stainless steel 1.4301, at normal temperature and at elevated temperatures. The constitutive laws obtained by tensile tests are compared with those recommended in Eurocode 3 (EC3), whose respective material models have recently been subject to change proposals, still requiring complete validation. Finally, the influence of the application of different constitutive laws on the numerical modelling of beams with rectangular hollow sections (RHS) and on their respective fire resistance are analysed.

Keywords: Steel strength / elevated temperatures / stainless steel

1- INTRODUÇÃO

A utilização do aço inoxidável no setor da construção para fins estruturais tem aumentado nos últimos anos. Apesar do seu elevado custo inicial, o aço inoxidável possui qualidades importantes para algumas aplicações, de que são exemplo a superior resistência à corrosão, aparência estética, facilidade de manutenção, durabilidade e o melhor comportamento a altas temperaturas, quando comparado com o convencional aço carbono (Baddoo, 2008; Gardner, 2005). A menor redução das propriedades mecânicas e superior ductilidade a altas temperaturas, que é analisada neste artigo para alguns casos de estudo, resultam numa maior resistência ao fogo das estruturas em aço inoxidável. O desenvolvimento das regras de cálculo para elementos estruturais em aço tem sido muitas vezes concretizado com estudos numéricos, devido à maior facilidade de parametrização dos casos de estudo, sendo a caracterização mecânica dos materiais determinante para a validação dos modelos. O conhecimento do comportamento estrutural do aço inoxidável em situação de incêndio ainda carece de desenvolvimento, tendo sido recentemente propostas para inclusão na nova geração do EC3 (CEN, 2021b) novas regras de cálculo ao fogo que incluem um novo modelo de relação tensão-extensão a altas temperaturas (Liang, 2019).

As ligas de aço inoxidável são caracterizadas por uma relação tensão-extensão não linear com um endurecimento significativo. Não existe patamar de cedência, sendo a tensão de cedência considerada em cálculo como a tensão limite de proporcionalidade a 0.2% (Fig. 1).

Os aços inoxidáveis mais comuns na construção são os austeníticos, que fornecem uma boa combinação entre a resistência à corrosão e as propriedades de conformação e fabricação. Com vista a uma melhor compreensão da caracterização mecânica do aço inoxidável em situação de incêndio, são apresentados e discutidos, os resultados de uma campanha experimental a provetes da classe austenítica 1.4301 (também conhecida por 304) a 500 °C, 600 °C e 700 °C. Foi estudado também o seu comportamento a 20 °C. A caracterização do material foi realizada através de ensaios de tração seguindo as normas NP EN 10002-1 (CEN, 2006) e ISO 6892-2 (ISO, 2018), com os provetes maquinados a partir de perfis de secção retangular oca (RHS).

Os resultados experimentais obtidos à temperatura normal são comparados com as leis constitutivas da versão em vigor da Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006) e a Parte 1-14 da nova gera-

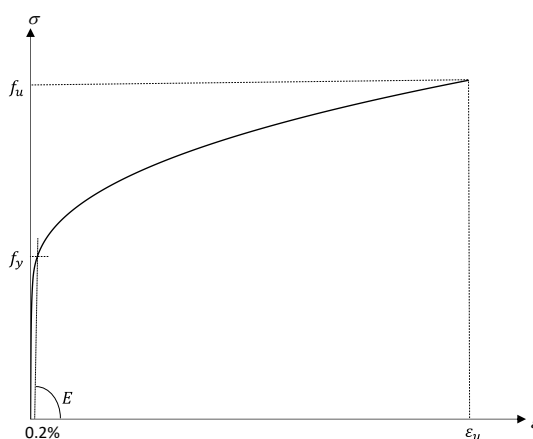


Fig. 1 | Relação tensão-extensão do aço inoxidável.

ção do EC3 (CEN, 2021a). A caracterização mecânica a temperaturas elevadas é analisada com as prescrições da Parte 1-2 do EC3 em vigor (CEN, 2005a) e da proposta de nova geração da mesma parte dedicada ao projeto em situação de incêndio (CEN, 2021b). Por fim, aplicando as diferentes relações tensão-extensão obtidas experimentalmente e propostas nas normas, são modeladas numericamente vigas simplesmente apoiadas em secção RHS, com o objetivo de melhor compreender a influência da caracterização mecânica do aço inoxidável na resistência ao fogo de estruturas. Foram realizadas simulações numéricas a vigas, sujeitas à flexão em três pontos, para 20 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C, utilizando um modelo com elementos finitos de casca com o programa ANSYS (ANSYS, 2020), com incremento de deslocamento. Foi utilizado o elemento SHELL181 com comportamento linear que possui quatro nós e seis graus de liberdade por nó. Observou-se uma correlação relativamente próxima entre os modelos com as diferentes leis.

2- MODELOS ANALÍTICOS PARA AS LEIS CONSTITUTIVAS DO AÇO INOXIDÁVEL

2.1. Modelos à temperatura normal

A Parte 1-4 do EC3 em vigor (CEN, 2006) propõe a utilização de uma relação tensão - extensão do aço inoxidável à temperatura normal, baseada no modelo Ramberg-Osgood de duas fases (Ramberg e Osgood, 1943; Hill, 1944; Mirambell e Real, 2000; Rasmussen, 2003; Gardner e Ashraf, 2006), de acordo com a seguinte relação:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n & \text{para } \sigma \leq f_y \\ 0.002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m & \text{para } f_y \leq \sigma \leq f_u \end{cases} \quad (1)$$

onde $E_y = \frac{E}{1 + 0.002nE/f_y}$; $\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}$ com $\varepsilon_u \leq A$; e $m = 1 + 3.5 \frac{f_y}{f_u}$

sendo f_y a tensão limite de proporcionalidade a 0.2%; f_u a tensão última; E o módulo de elasticidade; n parâmetro que toma o valor de 6, considerando tensões longitudinais para aços austeníticos; e A o alongamento após rotura obtido da EN10088 (CEN, 2005b).

A nova geração do EC3 terá uma nova parte para a modelação numérica de estruturas em aço (CEN, 2021a). Esta Parte designada de 1-14 (prEN1993-1-14:2021) incluirá as leis constitutivas à temperatura normal dos aços, onde se inclui a lei proposta para elementos em aço inoxidável. Esta nova Parte mantém o mesmo modelo Ramberg-Osgood de duas fases (eq. 1), mas propõe a utilização de valores ligeiramente diferentes para os parâmetros m e n . n é considerado igual a 7 para aços austeníticos e m é dado pela equação $m = 1 + 2.8 \frac{f_y}{f_u}$.

2.2. Modelos a temperaturas elevadas

A temperaturas elevadas, a relação tensão-extensão do aço inoxidável é determinada de acordo com a Parte 1-2 do EC3 (CEN, 2005b; Zhao, 2002), através das seguintes expressões:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{E_{a,\theta}\varepsilon}{1+a\varepsilon^b} & \text{para } \varepsilon \leq \varepsilon_{c,\theta} \\ f_{p0.2,\theta} - e + (d/c)\sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2} & \text{para } \varepsilon_{c,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta} \end{cases} \quad (2)$$

onde $\varepsilon_{c,\theta} = f_{p0.2,\theta}/E_{a,\theta} + 0.002$ e as funções a , b , c , d e e são dadas na Tabela 1.

Tabela 1 | Funções para cálculo da lei constitutiva de acordo com a EN1993-1-2:2005.

$a = \frac{E_{a,\theta}\varepsilon_{c,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{f_{p0.2,\theta}\varepsilon_{c,\theta}^b}$	$b = \frac{(1 - E_{ct,\theta}\varepsilon_{c,\theta}/f_{p0.2,\theta})E_{a,\theta}\varepsilon_{c,\theta}}{(E_{a,\theta}\varepsilon_{c,\theta}/f_{p0.2,\theta} - 1)f_{p0.2,\theta}}$	$e^2 = \frac{(f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta})^2}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})E_{ct,\theta} - 2(f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta})}$
$c^2 = (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})\left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta} + \frac{e}{E_{ct,\theta}}\right)$		$d^2 = e(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{c,\theta})E_{ct,\theta} + e^2$

sendo $f_{p0.2,\theta}$ a tensão limite de proporcionalidade a 0.2%, $f_{u,\theta}$ a tensão última, E_{θ} o módulo de elasticidade e $\varepsilon_{u,\theta}$ a extensão última, à temperatura θ .

Assim como no aço carbono, as propriedades mecânicas do aço inoxidável, quando submetido a altas temperaturas, sofrem reduções significativas. A Tabela 2 apresenta os fatores de redução das propriedades mecânicas e a extensão última do aço 1.4301 para as temperaturas analisadas neste trabalho, de acordo com a EN1993-1-2:2005.

A nova geração da Parte 1-2 do EC3 (prEN1993-1-2:2021), ainda em desenvolvimento, propõe um novo modelo baseado na formulação Ramberg-Osgood de duas fases (Liang, 2019), similar ao realizado à temperatura normal, que se descreve de seguida.

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_{a,\theta}} + 0.002\left(\frac{\sigma}{f_{p0.2,\theta}}\right)^{n_{\theta}} & \text{para } \sigma \leq f_{p0.2,\theta} \\ \frac{\sigma - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}} + \left(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}}\right)\left(\frac{\sigma - f_{p0.2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}}\right)^{m_{\theta}} + \varepsilon_{p0.2,\theta} & \text{para } f_{p0.2,\theta} \leq \sigma \leq f_{u,\theta} \end{cases} \quad (3)$$

onde:

$$E_{p0.2,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{1 + 0.002n_{\theta} \frac{E_{a,\theta}}{f_{p0.2,\theta}}} \quad \text{e} \quad \varepsilon_{u,\theta} = 1 - \frac{f_{2,\theta}}{f_{u,\theta}} \text{ com } 0.02 \leq \varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon_u \quad (4)$$

$$m_{\theta} = \frac{\ln\left(\frac{0.02 - \varepsilon_{p0.2,\theta} - \left[\frac{f_{2,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}}\right]}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta} - \left[\frac{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}}\right]}\right)}{\ln\left(\frac{f_{2,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}}\right)} \text{ com } 1.5 \leq m_{\theta} \leq 5 \quad (5)$$

sendo $\varepsilon_{p0.2,\theta}$ a extensão total correspondente a $f_{p0.2,\theta}$; $f_{2,\theta}$ a tensão correspondente a uma extensão total de 2% à temperatura θ ; e n_{θ} toma o valor de 7 para aços austeníticos. A Tabela 3 apresenta os fatores de redução das propriedades mecânicas (CEN, 2021b).

Tabela 2 | Parâmetros para o aço inoxidável de acordo com a EN1993-1-2:2005.

Temperatura (°C)	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{0.2p,\theta} = \frac{f_{0.2p,\theta}}{f_y}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{u,\theta}}{f_u}$	$k_{Ect,\theta} = \frac{E_{ct,\theta}}{E_a}$	ε_u
500	0.8	0.54	0.67	0.02	0.4
600	0.76	0.49	0.58	0.02	0.35
700	0.71	0.4	0.43	0.02	0.3

Tabela 3 | Fatores de redução para o aço inoxidável de acordo com o prEN1993-1-2:2021.

Temperatura (°C)	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{0.2p,\theta} = \frac{f_{0.2p,\theta}}{f_y}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{u,\theta}}{f_u}$	$k_{2,\theta} = \frac{f_{2,\theta}}{f_y}$
500	0.8	0.5	0.61	0.73
600	0.76	0.46	0.54	0.68
700	0.71	0.38	0.40	0.54

3- CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO AÇO INOXIDÁVEL

3.1. Ensaios de tração à temperatura normal

A caracterização do material à temperatura normal foi realizada através de ensaios de tração segundo a NP EN 10002-1 (CEN, 2006), com provetes planos maquinados a partir de perfis de secção RHS (100x150 mm) com espessura nominal de 5 mm, Fig. 2a. Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina de ensaios universal INSTRON 4485, com velocidade de deslocamento de 1.35 mm/min, Fig. 2b.

3.2. Ensaios de tração a temperaturas elevadas

A caracterização do material a temperaturas elevadas foi realizada através de ensaios de tração (EN ISO 6892-2), com os provetes maquinados a partir de perfis de secção RHS, Fig. 2a). O exten-

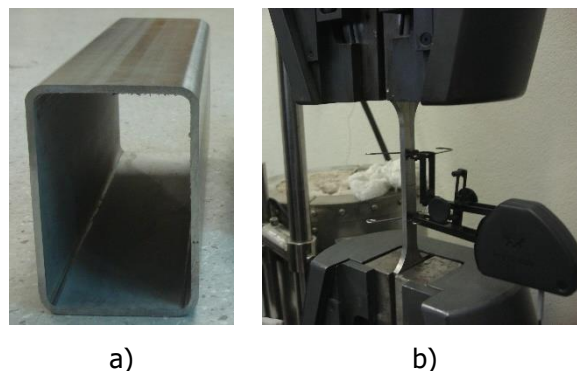


Fig. 2 | "Setup" dos ensaios de tração a temperatura normal

sómetro mecânico atuou fora do forno até ao nível de 10%, conforme se representa na Fig. 3. A amostra foi inicialmente aquecida para que o ensaio seja efetuado em regime estacionário. Foi utilizada uma taxa de aquecimento de 40 °C/min e uma taxa de deslocamento de 1.35 mm/min, depois de ser atingida a temperatura definida para a amostra. O forno possui um controlador PID para seguir a evolução de temperatura do provete, Fig. 3.

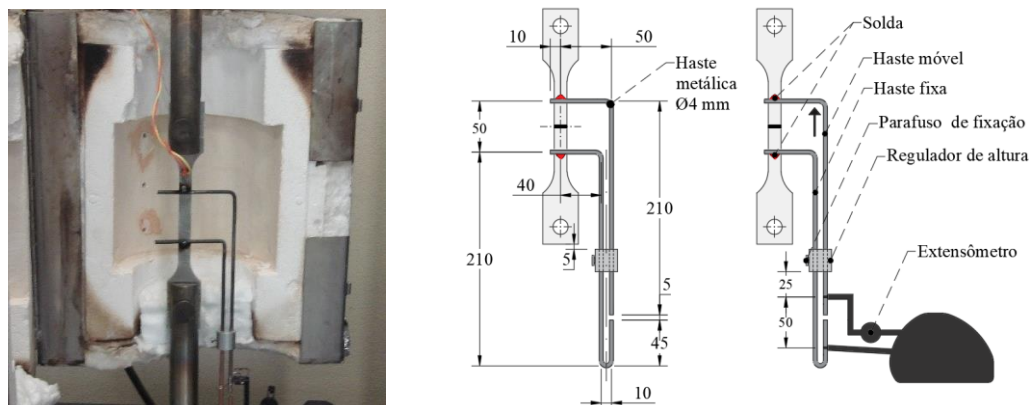


Fig. 3 | Sistema para ensaios de tração a temperaturas elevadas (dimensões em mm).

4- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Análise à temperatura normal

As propriedades materiais obtidas dos ensaios à tração são elencadas nas tabelas 4 e 5.

A Fig. 4a) apresenta uma comparação entre as leis constitutivas da versão em vigor da Parte 1-4 do EC3 (CEN, 2006), da proposta incluída na Parte 1-14 da nova geração do EC3 (CEN, 2021a) e dos resultados experimentais obtidos a 20 °C. As leis constitutivas analíticas do EC3 foram obtidas aplicando as propriedades mecânicas medidas experimentalmente (Tabela 4) nas respetivas formulações. Observa-se que tanto as leis do EC3 como as relações tensão-extensão obtidas experimentalmente apresentam comportamentos muito próximos entre si.

Tabela 4 | Parâmetros obtidos dos ensaios de tração à temperatura normal (1/2).

Provete	Área da secção transversal (mm ²)	Módulo de Elasticidade Ea (GPa)	Força máxima Fm (kN)	Tensão última Rm (MPa)	Tensão limite proporcionalidade Rp0.2 (MPa)	Extensão máxima
TTA-1	61.15	219.38	42.04	687.47	383.32	49.88
TTA-2	60.63	191.02	43.62	719.51	372.32	53.08
TTA-3	59.14	204.13	43.89	742.17	401.83	53.34
Média		204.84	43.19	716.38	385.82	52.10
Desvio padrão		14.19	1.00	27.49	14.91	1.93

Tabela 5 | Parâmetros obtidos dos ensaios de tração à temperatura normal (2/2).

Provete	Extensão total correspondente a $R_{p0.2}$	$R_{p0.01}$ (MPa)	$R_{p0.05}$ (MPa)	$R_{p1.0}$ (MPa)	Extensão total correspondente a $R_{p1.0}$	Tensão a 2.0 % de extensão (R_2) (MPa)
TTA-1	0.38	266.47	323.10	429.75	1.19	441.98
TTA-2	0.40	105.03	248.68	424.56	1.23	441.04
TTA-3	0.40	306.69	347.55	447.04	1.22	463.02
Média	0.39	226.06	306.44	433.78	1.21	448.68
Desvio padrão	0.01	106.73	51.50	11.77	0.02	12.43

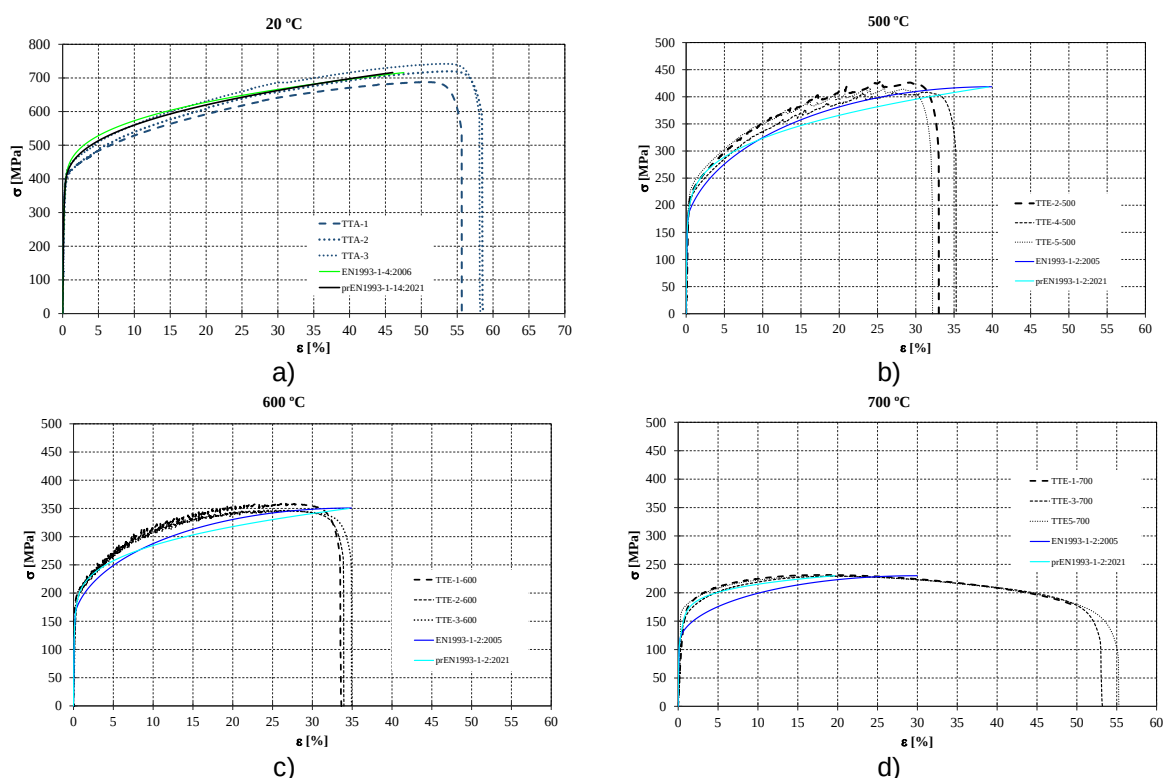


Fig. 4| Leis constitutivas obtidas: a) temperatura normal; b) 500 °C; c) 600 °C; d) 700 °C.

4.2. Análise a temperaturas elevadas

A tabela 6 apresenta as propriedades mecânicas obtidas dos ensaios experimentais à tração a 500 °C (TTE-i-500), 600 °C (TTE-i-600) e 700 °C (TTE-i-700), respectivamente.

As comparações entre as leis constitutivas do EC3 e as relações tensão-extensão obtidas experimentalmente a altas temperaturas são representadas na Fig. 4. As leis EC3 foram obtidas aplicando as propriedades mecânicas medidas experimentalmente (Tabela 6). Devido a dificuldade de medição do módulo de elasticidade a temperaturas elevadas consideraram-se os respectivos fatores de redução do EC3, que são iguais em ambas as versões EN1993-1-2:2005 e prEN1993-1-2:2021. É possível observar que as leis propostas na nova geração do EC3 apresentam relações mais próximas dos resultados obtidos dos ensaios experimentais, principalmente para menores valores de extensão.

Tabela 6 | Parâmetros obtidos dos ensaios de tração a altas temperaturas.

Provete	Área da secção transversal (MPa)	Força máxima Fm (kN)	Tensão última Rm (MPa)	Tensão limite proporcionalidade Rp0.2 (MPa)	Tensão a 2.0 % de extensão (R2) (MPa)
TTE-2-500	60.00	25.84	430.60	179.95	252.08
TTE-4-500	62.50	25.54	408.56	180.66	243.10
TTE-5-500	60.38	25.14	416.31	191.71	261.60
Média		25.50	418.49	184.11	252.26
Desvio padrão		0.35	11.18	6.59	9.25
TTE-1-600	60.00	21.53	358.83	190.25	229.70
TTE-2-600	60.63	21.04	346.99	149.05	224.59
TTE-3-600	60.63	21.01	346.62	171.63	229.46
Média		21.19	350.81	170.31	227.92
Desvio padrão		0.29	6.95	20.63	2.88
TTE-1-700	60.38	13.98	231.46	87.32	188.15
TTE-3-700	60.24	13.80	229.15	113.46	177.09
TTE-5-700	60.00	13.77	229.43	164.38	189.08
Média		13.85	230.01	121.72	184.78
Desvio padrão		0.11	1.26	39.19	6.67

5- SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE VIGAS DE SECÇÃO RETANGULAR OCA

5.1. Modelo Numérico

O modelo numérico é baseado no método dos elementos finitos utilizando o software Ansys APDL (ANSYS, 2020). A superfície média da secção SHS150x100x5 é modelada através do elemento finito do tipo casca SHELL181, de quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, deslocamentos e rotações segundo os eixos X, Y e Z, adequado para a análise de cascas finas a moderadamente espessas no regime linear em não linear de grandes deformações, incluindo o comportamento plástico do material.

Os modelos com não linearidade geométrica e material, consideram as leis de comportamento do material apresentadas na secção 2, nas versões atuais do Eurocódigo e as propostas na nova geração, baseadas nas propriedades do material determinadas experimentalmente. São consideradas as imperfeições geométricas locais com amplitude correspondente a 80% das tolerâncias geométricas de fabrico e baseadas no primeiro modo de instabilidade local de encurvadura determinado por análise linear elástica de encurvadura.

A viga, com a secção reta apresentada na figura 5, é solicitada por flexão em três pontos, considerando um apoio biarticulado e um apoio simples restringindo o deslocamento normal de todos os nós do banzo inferior da secção, com um comprimento total de 1.37 [m] e um comprimento de flexão de 1.21 [m].

A solução é baseada no método de Newton-Raphson, com deslocamento incremental e iterativo no banzo superior da secção central, com um incremento mínimo de 10^{-6} [m].

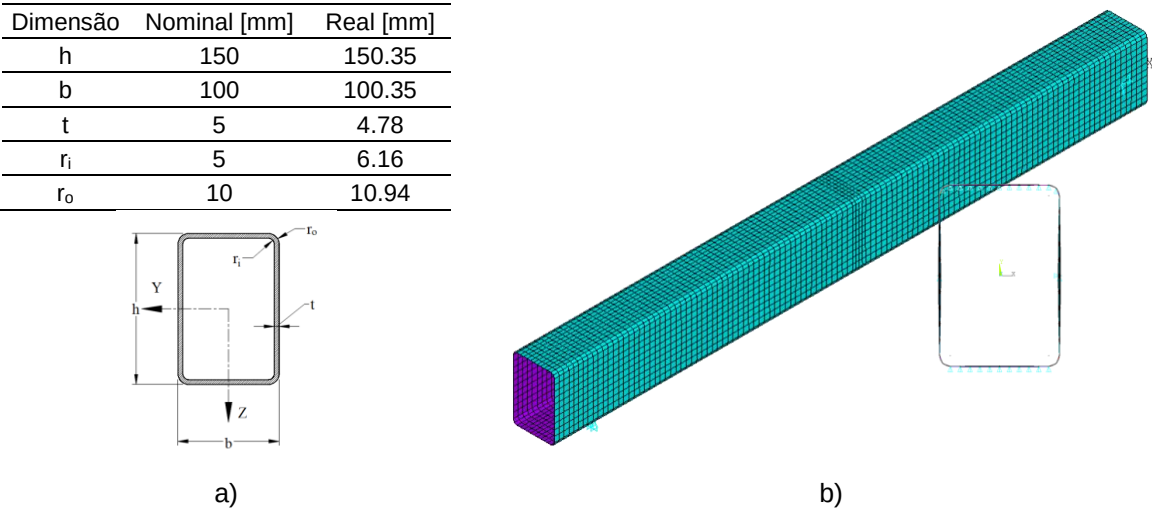


Fig. 5| a) Dimensões da secção transversal. b) Modelo numérico de elementos finitos.

5.1. Comportamento à temperatura normal

A imposição de um deslocamento incremental no banzo superior a meio vão da secção tubular origina um fenómeno de instabilidade localizada nos banzos da secção, conforme é apresentado na figura 6. Esta figura representa a distribuição das tensões equivalentes de von-Mises no último incremento de deslocamento em que se verifica a condição de equilíbrio do elemento, considerando as duas leis do material à temperatura ambiente

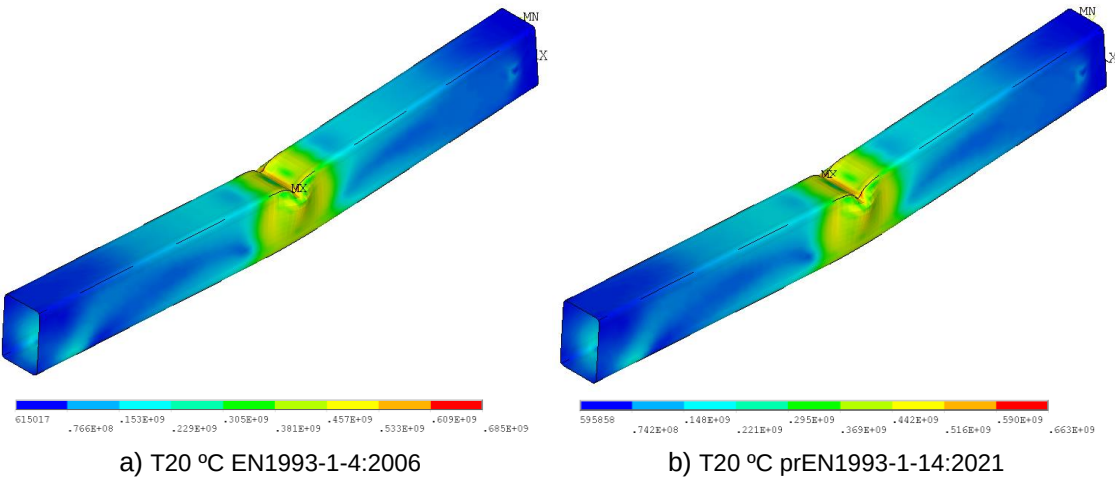


Fig. 6| Exemplos de distribuição da tensão equivalente de von-Mises.

A imposição do deslocamento a meio vão do elemento permite obter, de forma indireta através da obtenção da força de reação dos apoios, a curva força (F) versus deslocamento transversal (D) a meio vão, e assim determinar a capacidade máxima resistente da viga. O resultado das duas simulações realizadas à temperatura ambiente é apresentado na figura 7 a). Verifica-se uma aproximação do comportamento com os dois modelos de material analisados.

Os valores da carga máxima resistente da viga à temperatura ambiente são apresentados na Tabela 7, sendo de 141,68 [kN] e 138,81 [kN], quando são utilizadas as curvas do comportamento do material da EN1993-1-4:2006 e da prEN1993-1-14:2021, respectivamente. Verifica-se uma redução de 2% da carga máxima resistente.

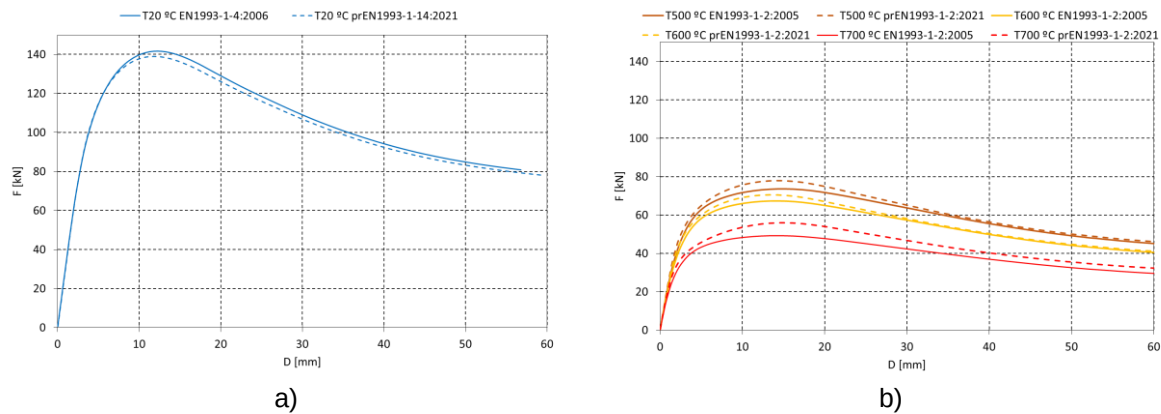


Fig. 7 | Resultados numéricos. a) Temperatura normal. b) Temperaturas elevadas.

Tabela 7 | Carga máxima das vigas à temperatura normal e temperaturas elevadas (kN).

	T=20 °C	T=500 °C	T=600 °C	T=700 °C
Atual Regulamento. (EN1993-1-4:2006 e EN1993-1-2:2005)	141.68	73.62	67.36	49.26
Nova Geração (prEN1993-1-14:2021 e prEN1993-1-2:2021)	138.81	77.97	70.62	55.96
Diferença (%)	-2,0%	5,6%	4,6%	12,0%

5.2. Comportamento a altas temperaturas

As simulações às temperaturas de 500 °C, 600 °C e 700 °C são realizadas em regime estacionário, considerando uma temperatura constante e uniforme em todo o modelo seguida da solicitação da ação mecânica até ao colapso da viga. Foi aplicado um deslocamento incremental no banzo superior a meio vão, à semelhança da secção anterior.

As curvas força vs deslocamento das simulações, apresentadas na figura 7b), mostram um aumento da capacidade resistente quando se altera a curva do comportamento do material da atual regulamentação para a proposta na nova geração dos Eurocódigos, em todas as temperaturas consideradas. Os valores da capacidade de carga máxima são apresentados na Tabela 7. Verifica-se um aumento de 5,6%, 4,5% e 12% da capacidade de carga para as temperaturas de 500 °C, 600 °C e 700 °C, respetivamente.

6- CONCLUSÕES

Um estudo experimental sobre a caracterização mecânica do aço inoxidável 1.4301, à temperatura normal e a altas temperaturas, foi apresentado. As leis constitutivas obtidas em ensaios à tração foram comparadas com as incluídas na Parte 1-4 e na futura Parte 1-14 do EC3 correspondentes à temperatura normal, e na Parte 1-2 do mesmo Eurocódigo para o dimensionamento em situação de incêndio, cujos modelos materiais preconizados foram recentemente sujeitos a propostas de alteração. Aplicando as diferentes leis constitutivas na modelação numérica de vigas com secções RHS, verificou-se que o comportamento à flexão destes elementos é semelhante, verificando-se uma ligeira redução da capacidade de carga à temperatura ambiente e um aumento da capacidade de carga a temperaturas elevadas que varia com a temperatura.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “StaSteFi - Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, PTDC/ECI-EGC/30655/2017, Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) componente FEDER e Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

REFERÊNCIAS

- Ansys Mechanical APDL. (2020), Academic Research Mechanical, Release 2020-R2, Help System, ANSYS, Inc.
- Baddoo, N. (2008), “Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities”, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64/11, pp. 1199-1206.
- CEN, European Committee for Standardisation. (2005), “EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation. (2005b), “EN 10088-2:2005, Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation. (2006), “EN 1993-1-4:2006, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-4: General rules – Supplementary rules for stainless steels”, Brussels, Belgium.

- CEN, European Committee for Standardisation. (2021a), “prEN 1993-1-14:2021, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis”, Brussels, Belgium.
- CEN, European Committee for Standardisation. (2021b), “prEN 1993-1-2:2021, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”, Brussels, Belgium.
- Gardner, L. (2005), “The use of stainless steel in structures”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, Vol. 7, pp. 45–55.
- Gardner, L. e Ashraf, M. (2006) *Structural design for non-linear metallic materials*, *Engineering Structures*, 5, Vol. 28, No. 6, pp. 926–934.
- Hill, H. N. (1944) “Determination of stress-strain relations from “offset” yield strength values”, Technical Note No. 927. Washington, D. C., USA: National Advisory Committee for Aeronautics.
- IPQ, Instituto Português da Qualidade. (2006), “NP EN 10002-1: 2006, Materiais Metálicos. Ensaios de Tracção – Parte 1 – Método de Ensaio à Temperatura Ambiente”, Bruxelas, Bélgica.
- ISO, International Organisation for Standardization. (2018), “ISO 6892-2: 2018, Metallic Materials. Tensile Testing – Part 2 – Method of Test at Elevated Temperature”, Geneva, Switzerland.
- Liang, Y., Manninen, T., Zhao, O., Walport, F., Gardner, L. (2019). “Elevated temperature material properties of a new high-chromium austenitic stainless steel”, *Journal of Constructional Steel Research*, 152, p. 261–273.
- Mirambell, E. e Real, E. (2000) “On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: an experimental and numerical investigation. *Journal of Constructional Steel Research*, 4, Vol. 54, No. 1, pp. 109–133.
- Ramberg, W., Osgood, W. R. (1943) “Description of stress-strain curves by three parameters”. Technical Note No. 902. Washington, D. C., USA: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Rasmussen, K.J.R. (2003) “Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys”. *Journal of Constructional Steel Research*, 1, Vol. 28, No. 6, pp. 926–934.
- Zhao, B. 2002. “Évaluation de la résistance au feu des éléments structuraux en acier inoxydable” (in French), *Construction Métallique*, CTICM, Vol. 4.