

# XIII CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA

TEMA ESPECIAL  
DIGITALIZAÇÃO



NOVEMBRO 25 e 26  
DOIS MIL E VINTE UM

Editores  
Luís Simões da Silva  
Paulo Vila Real  
Carlos Couto  
Trayana Tankova



## CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS RHS EM AÇO INOXIDÁVEL

Nuno Lopes<sup>a</sup>, Flávio Arrais<sup>a</sup>, Paulo Vila Real<sup>a</sup>, Matheus Alves<sup>b</sup>, Luís Mesquita<sup>c</sup>, Paulo A. G. Piloto<sup>d</sup> e Joaquim Pinho-da-Cruz<sup>e</sup>

<sup>a</sup> RISCO, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

<sup>b</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil

<sup>c</sup> ISISE, Instituto Politécnico de Bragança

<sup>d</sup> LAETA - INEGI, Instituto Politécnico de Bragança

<sup>e</sup> TEMA, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

**Resumo.** Com o objetivo de analisar experimentalmente o comportamento mecânico de elementos estruturais em aço inoxidável a temperaturas elevadas, foi realizado um conjunto de ensaios de resistência ao fogo, à flexão em três pontos, a perfis com secção transversal RHS150x100x5, em aço inoxidável 1.4301, aplicando a curva de aquecimento padrão ISO 834. Os resultados são analisados e comparados com os obtidos por modelação numérica, realizada com o programa de elementos finitos SAFIR, validando o modelo numérico construído e a aplicação da lei constitutiva para o aço inoxidável a temperaturas elevadas proposta na nova geração da Parte 1-2 do EC3.

### 1. Introdução

O recente aumento do interesse pela aplicação do aço inoxidável na construção tem-se devido às suas principais qualidades como a alta resistência e ductilidade, boa aparência estética, alta resistência à corrosão e baixo custo de manutenção [1-3]. Adicionalmente, é também conhecido que apresenta uma melhor resistência a temperaturas elevadas quando comparado com o aço carbono [4]. O aço inoxidável mais utilizado é o aço austenítico 1.4301 [5] (também conhecido por 304), que geralmente contém um mínimo de 16% de cromo e 8% de níquel.

Estudos sobre o comportamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável têm-se focado no desenvolvimento de novas fórmulas de cálculo para vigas e colunas [6-8], mas ainda

são importantes evidências experimentais sobre a resistência ao fogo dos mesmos, em particular de vigas a temperaturas elevadas.

O aço inoxidável é caracterizado por uma relação tensão-extensão não linear com um endurecimento significativo [9]. Não existe patamar de cedência, sendo a tensão de cedência considerada em cálculo como a tensão limite de proporcionalidade a 0.2% (Fig. 1).

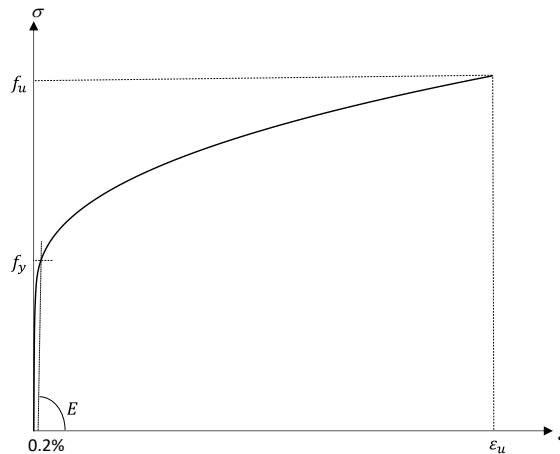


Fig. 1: Relação tensão-extensão do aço inoxidável

Em relação à resistência mecânica em situação de incêndio, a nova geração da Parte 1-2 do Eurocódigo 3 (prEN1993-1-2:2021), ainda em desenvolvimento [10], propõe um novo modelo para a lei constitutiva do aço inoxidável a altas temperaturas baseado na formulação Ramberg-Osgood de duas fases [11,12], diferente do modelo atualmente em vigor na EN1993-1-2:2005 [13].

Com o objetivo de analisar experimentalmente o comportamento mecânico a temperaturas elevadas de vigas em aço inoxidável 1.4301, foi realizado um conjunto de ensaios de resistência ao fogo, à flexão em três pontos, a perfis com secção transversal RHS150x100x5. Os ensaios foram realizados aplicando a curva de aquecimento padrão ISO 834 [14] em condições transientes, submetendo a viga a um carregamento mecânico constante enquanto o elemento é aquecido até serem atingidos os critérios de colapso preconizados na EN1363-1:2020 [15].

Os resultados obtidos são analisados e comparados com os obtidos por modelação numérica realizada com o programa de elementos finitos SAFIR [16], considerando análises material e geometricamente não lineares com imperfeições (GMNIA). Nas análises numéricas foram considerados ambos os modelos de lei constitutiva da Parte 1-2 do EC3 em vigor [4] e da sua nova geração [10], observando-se uma melhor aproximação aos resultados experimentais dos modelos com a nova lei constitutiva e validando o modelo numérico realizado.

## 2. Campanha experimental

### 2.1 Caso de estudo

A campanha experimental teve como objetivo principal avaliar o comportamento térmico e mecânico de vigas em aço inoxidável da classe 1.4301 a temperaturas elevadas, realizando dois ensaios de resistência ao fogo semelhantes, à flexão em três pontos, a perfis com secção transversal retangular oca RHS150x100x5. O elemento de ensaio foi submetido a um processo de aquecimento correspondente à curva padrão ISO 834 (a temperatura é controlada no forno a gás por um termopar de placa), após aplicação da carga que é imposta como constante durante todo o processo de aquecimento. O valor da carga foi de 61103.5 N, que corresponde ao valor

médio da capacidade resistente obtida em campanha experimental anterior a ensaios em regime estacionário com temperatura constante de 700 °C [17].

A configuração experimental é baseada num pórtico de reação em aço, construído em torno do forno de resistência ao fogo. Este pórtico permite a fixação dos apoios utilizados para os ensaios de flexão em 3 pontos e da aplicação de carga. As vigas são posicionadas na direção vertical e a carga é aplicada pelo atuador hidráulico na direção horizontal, ver Fig. 2.

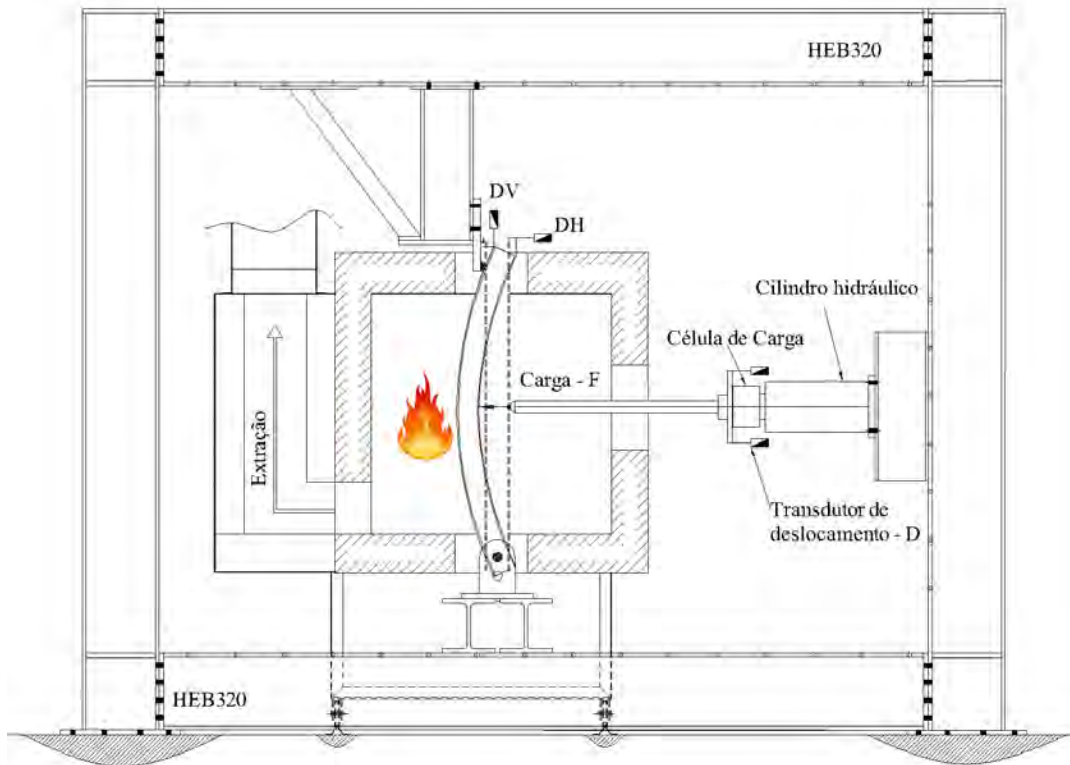


Fig. 2: Pórtico de reação, forno e viga simplesmente apoiada

Quatro transdutores de deslocamento potenciométricos são aplicados na frente da célula de carga para medir o deslocamento máximo da viga (D) para cada etapa de carga (F). A viga tem um apoio duplo na parte inferior e um apoio simples em forquilha na parte superior. A Fig. 3 apresenta a materialização das condições de apoio.

A carga é transferida do atuador hidráulico para a viga através de um meio cilindro, distribuindo a carga por todo o banzo superior, conforme se apresenta na Fig. 3. Não existem reforços no ponto de aplicação da carga ou nos apoios, sendo a transferência de forças dos banzos concretizada através dos cantos das secções com o conseqüente carregamento excêntrico da alma da secção transversal. Ambas as extremidades das vigas são isoladas por partes internas de fibra cerâmica para reduzir a perda de calor da cavidade interna dos perfis RHS. A relação profundidade-vão é superior a 8, o que é suficiente para reproduzir o comportamento de viga. As propriedades mecânicas dos elementos de ensaio foram medidas através de ensaios à tração [18].

Como referido, as mesmas condições de ensaio são realizadas duas vezes, sendo aqui denominados de ensaio Exp 1 e ensaio Exp 2.

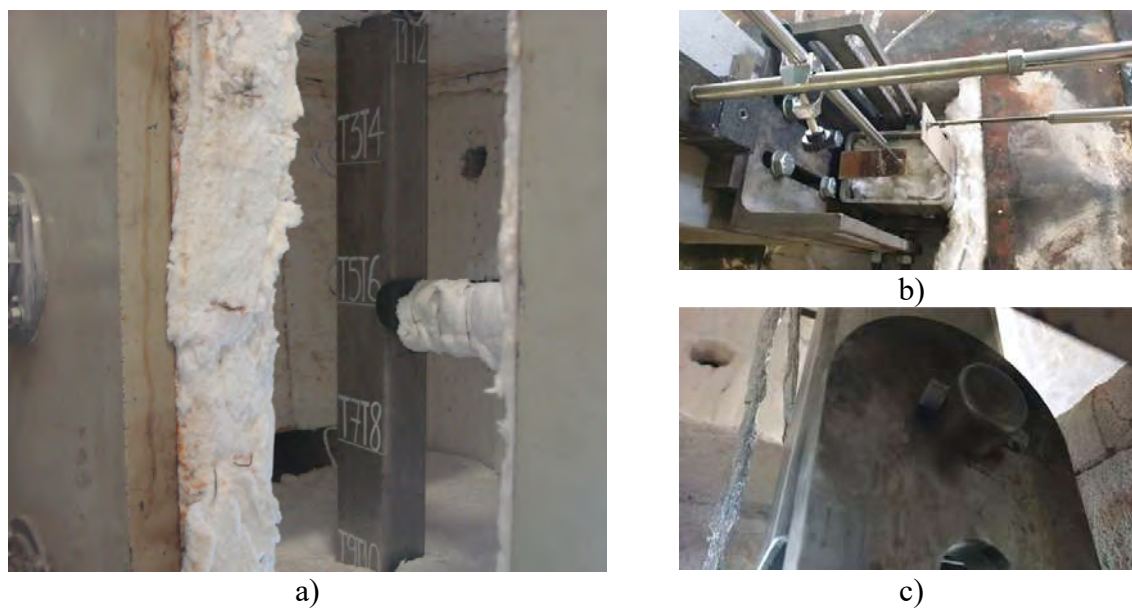


Fig. 3: Viga dentro do forno e condições de apoio

## 2.2 Instrumentação

A instrumentação foi composta por quatro transdutores de deslocamento, como se apresenta na Fig. 2. Os transdutores foram colocados entre o pórtico e o sistema de carregamento, permitindo a medição do deslocamento a meio do vão. A média dos quatro transdutores foi então calculada para registar o deslocamento  $D$  (ver Fig. 2). As temperaturas no perfil foram medidas por dez termopares do tipo K posicionados ao longo do seu comprimento. Foram utilizados dois termopares para cada posição. A Fig. 4 apresenta a posição de cada termopar (T1, T2, T3, T4 e T5).

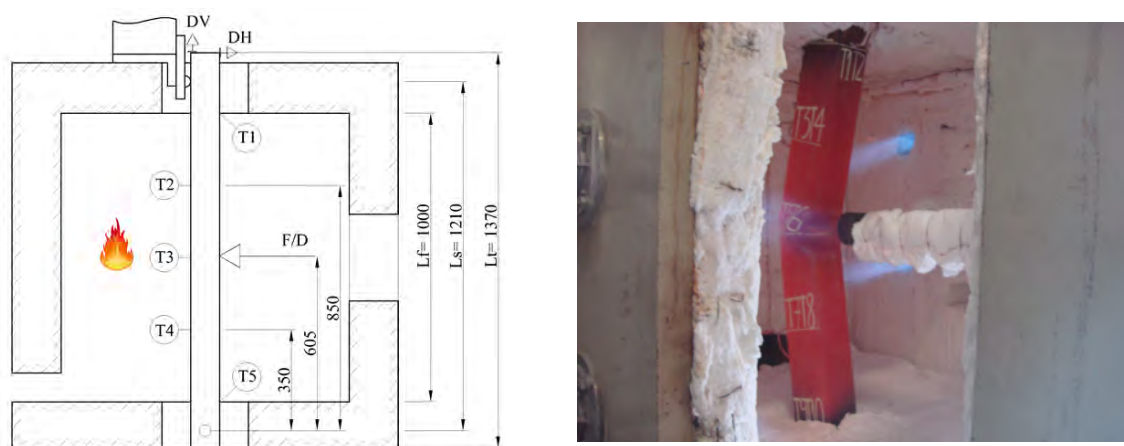


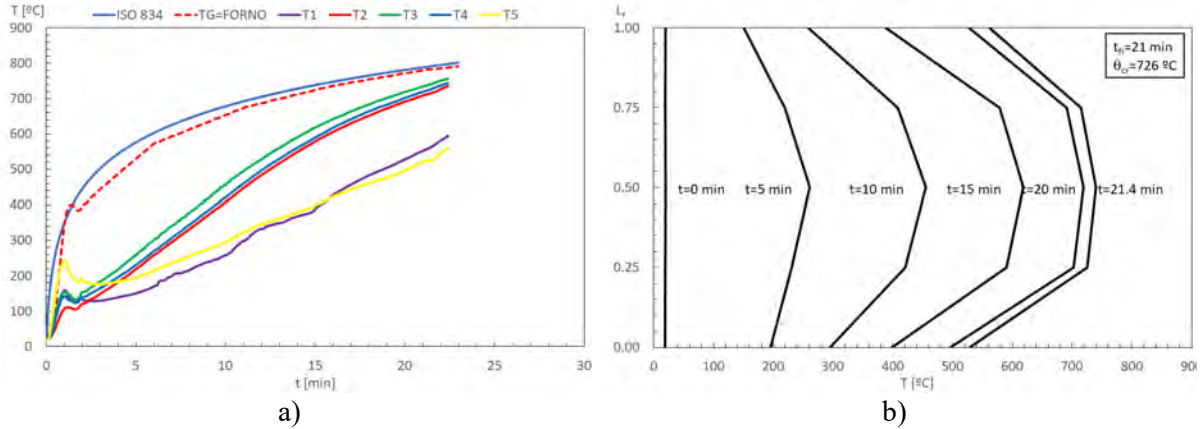
Fig. 4: Posição da instrumentação

## 2.3 Resultados dos ensaios

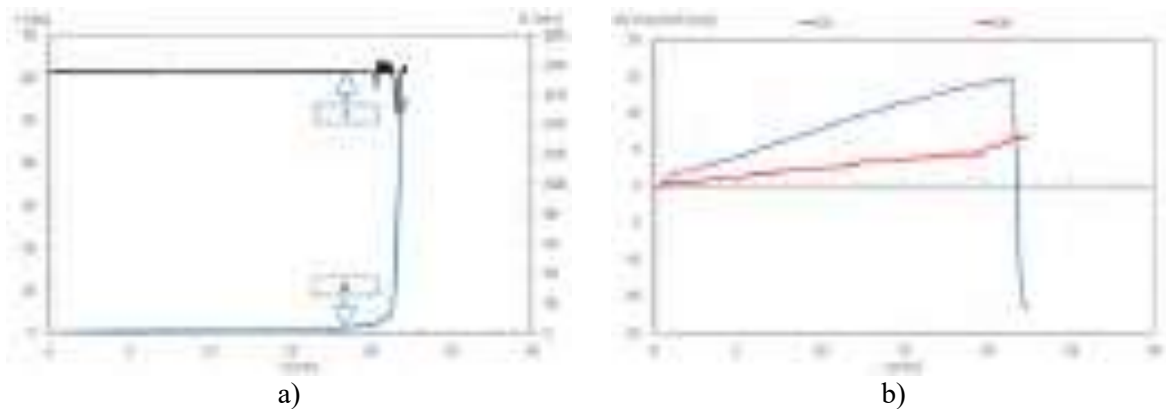
Por razões de limitação de espaço nesta secção detalham-se apenas os resultados do ensaio Exp 2 e resumem-se os resultados do ensaio Exp 1.

A Fig. 5a apresenta a curva de aquecimento imposta (ISO 834) e a evolução das temperaturas em função do tempo medida nos diferentes termopares do ensaio Exp 2. Na Fig. 5b ilustra-se a distribuição de temperaturas na viga em diferentes momentos do ensaio.

As medições relativas à evolução do deslocamento ( $D$ ) e da carga ( $F$ ) do atuador hidráulico durante o ensaio Exp 2 são apresentadas na Fig. 6a. Na Fig. 6b ilustra-se a evolução dos deslocamentos vertical ( $DV$ ) e horizontal ( $DH$ ) medidos na extremidade superior da viga (Fig. 4) durante o ensaio.



**Fig. 5:** Evolução das temperaturas do ensaio Exp 2: a) em função do tempo nos diferentes termopares; b) em função do tempo e da posição na viga



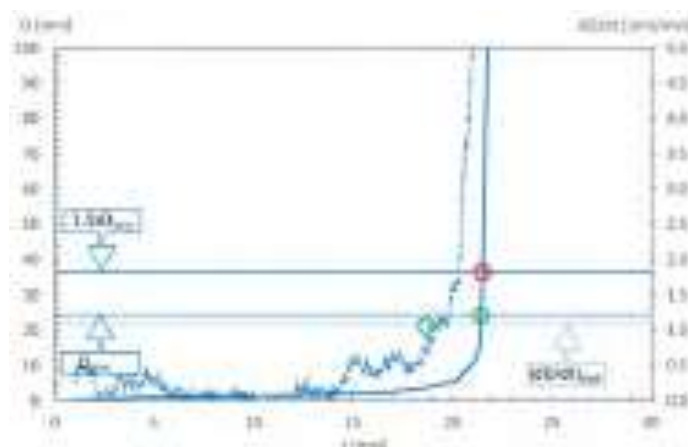
**Fig. 6:** Medições do ensaio Exp 2 relativas a: a) Evolução dos deslocamentos e da carga durante o ensaio; b) Evolução do deslocamento vertical e horizontal durante o ensaio

A Fig. 7 apresenta a evolução do deslocamento ( $D$ ) e da taxa de deslocamento ( $dD/dt$ ) durante o ensaio, parâmetros utilizados para a definição do colapso de acordo com a EN1363-1:2020 [15]. Os critérios preconizados nesta norma para a definição de colapso baseiam-se nos limites apresentados na Eq. (1) e na Eq. (2). A taxa de deslocamento foi calculada no valor da média móvel, baseado em 35 instantes de tempo (aproximadamente 1 min).

$$D_{limit} = \frac{L^2}{400d} [mm] \quad (1)$$

$$\left(\frac{dD}{dt}\right)_{limit} = \frac{L^2}{9000d} [mm/min] \quad (2)$$

Considera-se que a viga colapsa [15] quando: i)  $D \geq 1.5 D_{limit}$  ou ii)  $D \geq D_{limit}$  e  $(dD/dt) \geq (dD/dt)_{limit}$ . No caso das vigas ensaiadas  $D_{limit} = 24.4$  mm,  $1.5 \times D_{limit} = 36.6$  mm e  $(dD/dt)_{limit} = 1.085$  mm/min.



**Fig. 7:** Evolução do deslocamento ( $D$ ) e da velocidade de deformação ( $dD/dt$ ) durante o ensaio Exp 2

A Tabela 1 apresenta os instantes de obtenção dos critérios de definição de colapso das vigas. Ambos os ensaios apresentaram comportamentos muito similares entre si.

**Tabela 1:** Tempos de colapso obtidos

Ensaio	$D_{\text{limit}}$	$(dD/dt)_{\text{limit}}$	$1.5x D_{\text{limit}}$	Critério i	Critério ii	Colapso
Exp 1	21.44 min	18.52 min	21.5 min	18.52 min	21.5 min	18.52 min
Exp 2	21.47 min	18.78 min	21.5 min	18.78 min	21.5 min	18.78 min

### 3. Modelação numérica

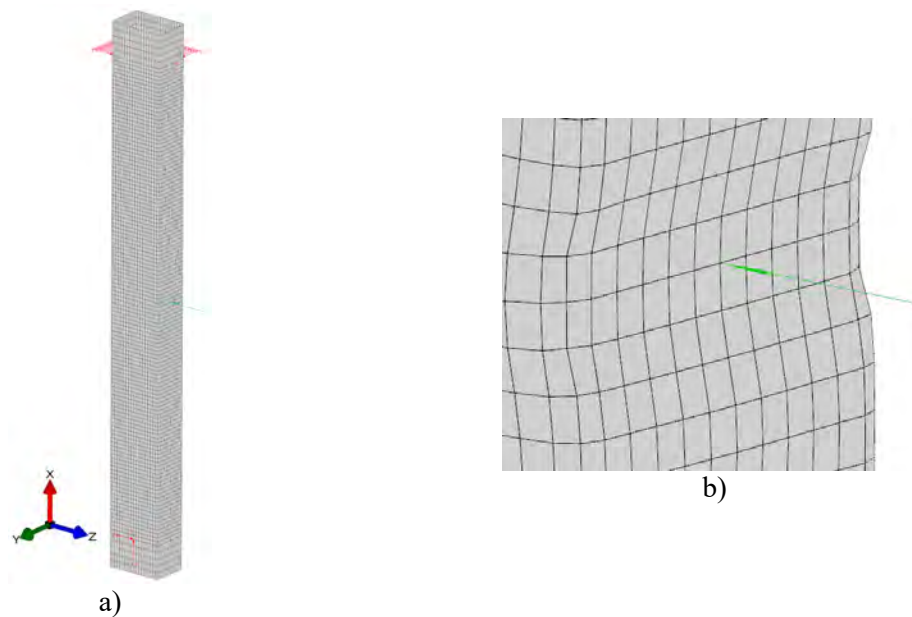
#### 3.1 Modelo

Um modelo de elementos finitos tridimensional foi desenvolvido com vista à realização de análises numéricas, geométrica e materialmente não lineares incluindo imperfeições (GMNIA), a elementos estruturais em aço inoxidável sujeitos ao fogo. Foi utilizado o programa SAFIR [16], programa especialmente desenvolvido na Universidade de Liège para a análise de estruturas em situação de incêndio, após implementação da lei constitutiva para o aço inoxidável da nova geração da Parte 1-2 do EC3 [10,19].

Por ser provável a ocorrência de fenómenos de encurvadura local, o modelo foi realizado com recurso a elementos finitos de casca quadriláteros com quatro nós, cada um com seis graus de liberdade (três translações e três rotações).

Com vista à modelação dos apoios concretizados na campanha experimental, foram restringidas as 3 translações em  $x$ ,  $y$  e  $z$  de dois nós para modelação do apoio duplo e para o apoio simples foram restringidas as translações em  $z$  no banzo oposto ao sentido de carregamento e as translações em  $y$  nas almas (Fig. 8a). Os nós na região de aplicação da carga foram acoplados para ter o mesmo deslocamento em  $z$  do nó de aplicação de carga. (Fig. 8b).

A distribuição de temperaturas na viga e respectivas evoluções ao longo do tempo, como se apresentam na Fig. 5b para o ensaio Exp 2, foram consideradas nas simulações numéricas.



**Fig. 8:** Modelo numérico: a) viga completa; b) aplicação da carga a meio vão

Foram ainda introduzidas imperfeições geométricas iniciais com a forma do primeiro modo de encurvadura e amplitude de 80% das tolerâncias essenciais de fabrico [20], obtidas com o programa CAST3M [21] e a interface Ruby [22]. Não foram consideradas no modelo tensões residuais nem tensões de canto melhoradas características destes perfis.

### 3.2 Leis constitutivas a altas temperaturas

A relação tensão-extensão do aço inoxidável a temperaturas elevadas preconizada na EN1993-1-2 em vigor [13] é baseada na seguinte relação  $\sigma = f(\varepsilon)$  [23]:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{E_{a,\theta}\varepsilon}{1+a\varepsilon^b} & \text{para } \varepsilon \leq \varepsilon_{c,\theta} \\ f_{p0.2,\theta} - e + (d/c)\sqrt{c^2 - (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon)^2} & \text{para } \varepsilon_{c,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{u,\theta} \end{cases} \quad (3)$$

onde  $\varepsilon_{c,\theta} = f_{0.2p,\theta}/E_{a,\theta} + 0.002$  e as funções  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $e$  são fornecidas na norma.

As propriedades mecânicas do aço inoxidável, quando submetido a altas temperaturas, sofrem reduções significativas, cujos fatores de redução são preconizados na Parte 1-2 do EC3 [13].

A nova geração da Parte 1-2 do EC3 (prEN1993-1-2:2021) [10], ainda em desenvolvimento, propõe um novo modelo baseado na formulação Ramberg-Osgood de duas fases [11,12], que apresenta um comportamento distinto da lei em vigor [18] e se descreve de seguida.

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_{a,\theta}} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{f_{p0.2,\theta}} \right)^{n_\theta} & \text{para } \sigma \leq f_{p0.2,\theta} \\ \frac{\sigma - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}} + \left( \varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{p0.2,\theta} - \frac{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}}{E_{p0.2,\theta}} \right) \left( \frac{\sigma - f_{p0.2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0.2,\theta}} \right)^{m_\theta} + \varepsilon_{p0.2,\theta} & \text{para } f_{p0.2,\theta} \leq \sigma \leq f_{u,\theta} \end{cases} \quad (4)$$

Os fatores de redução das propriedades mecânicas a temperaturas elevadas nesta nova proposta diferem dos valores atualmente em vigor.

## 4. Discussão de resultados

A Fig. 9 apresenta as vigas deformadas após os ensaios e uma deformada tipo das obtidas nas simulações numéricas, podendo-se observar que se assemelham entre si.

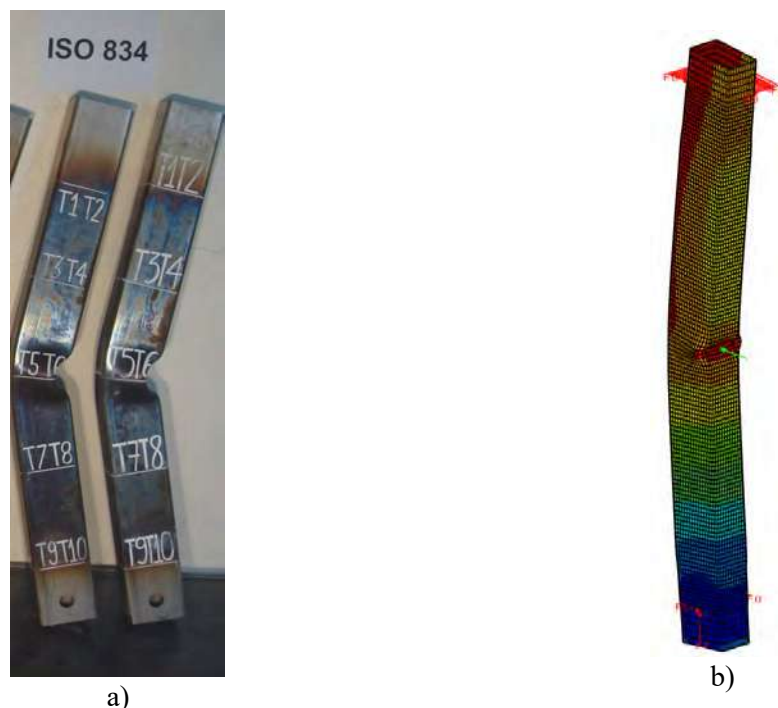


Fig. 9: Deformadas: a) após ensaios experimentais; b) obtida numericamente (x5)

A evolução dos deslocamentos a meio vão ( $D$ ) obtidos experimentalmente e numericamente, aplicando as leis constitutivas da Parte 1-2 do EC3 em vigor [13] e da nova geração da mesma norma [10], são comparadas na Fig. 10. Pode-se observar que com a aplicação da relação tensão-extensão a temperaturas elevadas proposta na nova geração da EN1993-1-2, o modelo numérico apresenta um comportamento mais próximo do medido experimentalmente.

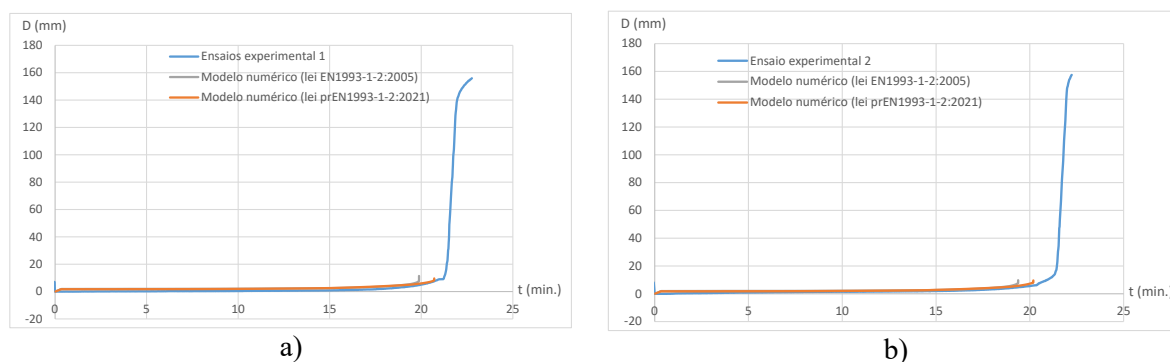


Fig. 10: Modelo numérico: a) viga completa; b) aplicação da carga a meio vão

## 5. Considerações finais

Neste trabalho foi apresentado um estudo experimental com a respetiva modelação numérica do comportamento mecânico ao fogo de vigas em aço inoxidável com secção retangular oca.

Analisaram-se os resultados obtidos de ensaios de resistência ao fogo, realizados com a curva de aquecimento padrão ISO834, onde se incluem os deslocamentos a meio vão e respetivas taxas de deslocamento, que são utilizados para definição dos critérios de colapso.

Com as observações apresentadas foi possível validar o modelo numérico realizado no programa SAFIR, que demonstra uma melhor aproximação aos resultados experimentais quando aplicada a lei constitutiva proposta na nova geração da Parte 1-2 do EC3.

## Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto “StaSteFi - Dimensionamento ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, PTDC/ECI-EGC/30655/2017, 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.

## Referências

- [1] Baddoo, N., “Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64/11, pp. 1199-1206, 2008.
- [2] Gardner, L., “Stability and design of stainless steel structures – Review and outlook”, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 141, pp. 208-216, 2019.
- [3] Mirambell, E. e Real, E., “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, 2000.
- [4] CEN, European Committee for Standardisation, “EN 1993-1-2:2005, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design”, Brussels, Belgium, 2005.
- [5] CEN, European Committee for Standardisation, “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, 2005.
- [6] Vila Real, P. M. M., Lopes, N., Simões da Silva, L., & Franssen, J. M. “Lateral-torsional buckling of stainless steel I-beams in case of fire”. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1302–1309, 2008.
- [7] Xing, Z., Kucukler, M., & Gardner, L. “Local buckling of stainless steel I-sections in fire: Finite element modelling and design”. *Thin-Walled Structures*, 161, 107486, 2021.
- [8] Xing, Z., Zhao, O., Kucukler, M., & Gardner, L. “Testing of stainless steel I-section columns in fire”. *Engineering Structures*, 227, 2021.
- [9] CEN, European Committee for Standardisation, “EN 1993-1-4:2006, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–4: General rules – Supplementary rules for stainless steels”, Brussels, Belgium, 2006.
- [10] CEN, European Committee For Standardisation. “prEN 1993-1-2:2021, Eurocode 3, Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”, Brussels, Belgium, 2021.
- [11] Ramberg, W., Osgood, W. R. “Description of stress-strain curves by three parameters”. Technical Note No. 902. Washington, D. C., USA: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [12] Liang, Y., Manninen, T., Zhao, O., Walport, F. and Gardner, L., “Elevated temperature material properties of a new high-chromium austenitic stainless steel” *Journal of Constructional Steel Research*, 152, 261-273, 2019.
- [13] CEN, European Committee For Standardisation. “EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General rules Structural fire design”, Brussels, Belgium, 2005.
- [14] ISO 834-1:1999 “Fire-resistance tests — Elements of building construction - Part 1: General requirements”, 1999.
- [15] CEN, EN1363-1:2020, “Fire resistance tests - Part 1: General requirements”, Brussels, 2020.

- [16] Franssen, J.-M., Gernay, T. “Modelling structures in fire with SAFIR®: theoretical background and capabilities”, *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3):300-323, 2017.
- [17] Alves, M., Mesquita, L., Piloto, P., Lopes, N., Arrais, F., Vila Real, P. & Pinho-da-Cruz, J., “Bending resistance of stainless steel beams at elevated temperatures”, 12º Congresso Nacional de Mecânica Experimental CNME 2020, Leiria, 2021.
- [18] Lopes, N., Arrais, F., Vila Real, P., Alves, M., Mesquita, L., & Piloto, P., “Resistência mecânica de elementos em aço inoxidável a temperaturas elevadas”, 12º Congresso Nacional de Mecânica Experimental CNME 2020, Leiria, 2021.
- [19] Pinho-da-Cruz, J., Lopes, N., Couto, C., Vila Real, P., “Modelação numérica da resistência ao fogo de elementos estruturais em aço inoxidável”, XIII Congresso de Construção Metálica e Mista, CMM, 2021.
- [20] CEN, European Committee For Standardisation. “EN 10219-2, Cold Formed Welded Structural Hollow Sections of Non-alloy and Fine Grain Steels - Part 2: Tolerances, Dimensions and Sectional Properties”, Brussels, Belgium, 2006.
- [21] CEA. CAST3M is a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission. url: <http://www-cast3m.cea.fr/>, 2015.
- [22] Couto, C.; Vila Real, P.; Lopes, N. “RUBY: an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M”, University of Aveiro, 2013.
- [23] Zhao, B. “Évaluation de la résistance au feu des éléments structuraux en acier inoxydable” (em francês), *Construction Métallique*, CTICM, Vol. 4, 2002.



**Secretariado da CMM**

Business Center Leonardo Da Vinci, lt.3 iParque,  
3040-540 Antanhol, Coimbra, Portugal

[cmm@cmm.pt](mailto:cmm@cmm.pt)

[www.cmm.pt](http://www.cmm.pt)

