



Resistência ao fogo de perfis pultrudidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP) para aplicações em reabilitação: estudo experimental, numérico e analítico

T. Morgado¹, J. R. Correia², N. Silvestre³, F. Branco²

¹CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

²CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

³LAETA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.136>

Artículo recibido el 29 de diciembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 01 de abril de 2016. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 2, Mayo – Agosto 2016, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.revistaalconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de mayo de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

Neste artigo é apresentado um estudo sobre a resistência ao fogo de vigas em perfis pultrudidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP). Foram realizados ensaios de resistência ao fogo em vigas com um vão de 1.3 m, expostas ao fogo de acordo com a curva temperatura-tempo da norma ISO 834. Nestes ensaios, avaliou-se o efeito de diferentes tipos de exposição ao fogo (em uma e três faces) e níveis de carga aplicados, bem como a eficácia de diferentes sistemas de proteção. Foi desenvolvido um modelo numérico térmico bidimensional no *software* ANSYS FLUENT para simular a evolução das distribuições de temperatura na secção transversal. Foi ainda desenvolvido um modelo analítico para determinar a evolução das deformações das vigas.

Palavras-chave: materiais compósitos, resistência ao fogo, campanha experimental, simulação numérica, modelo analítico.

ABSTRACT

This paper presents a study about the fire behaviour of glass fibre reinforced polymer (GFRP) pultruded beams. Fire resistance tests were carried out in beams with a span of 1.3 m, exposed to fire according to the time-temperature curve defined in the ISO 834 standard. In these tests the effects of different types of fire exposure (one and three sides) and load levels, as well as the efficacy of different fire protection systems were evaluated. In order to study the evolution of temperature distributions during the fire resistance tests, a two-dimensional numerical model was developed using the commercial software ANSYS FLUENT. Also an analytical model was developed to estimate the mechanical response of the beams during fire exposure.

Keywords: composite materials; fire behaviour; experimental campaign; numerical simulation; analytical model.

RESUMEN

El presente artículo presenta un estudio sobre la resistencia al fuego de vigas fabricadas con perfiles pultrusionados de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP). Se realizaron ensayos de resistencia al fuego en vigas con un vano de 1.3 m, expuestas a la acción del fuego según la norma ISO 834. En estos ensayos, se evaluó el efecto de diferentes tipos de exposición al fuego y los niveles de carga aplicados, así como la eficacia de diferentes sistemas de protección. Se desarrolló un modelo numérico en el *software* ANSYS FLUENT para simular la evolución del campo de temperaturas en la sección transversal y un modelo analítico para determinar la evolución de la deformación de las vigas.

Palabras clave: materiales compuestos, resistencia al fuego, campaña experimental, simulación numérica, modelo analítico.

Autor a contactar: Tiago Morgado (tiago.m.r.morgado@ist.utl.pt)

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros reforçados com fibras (FRP) têm vindo a ser cada vez mais utilizados em aplicações da engenharia civil por apresentarem diversas vantagens em relação aos materiais tradicionalmente utilizados neste sector, nomeadamente, peso próprio reduzido, elevada resistência, boas propriedades de isolamento térmico, custos de manutenção reduzidos e excelente durabilidade. Contudo, para além do comportamento frágil e da elevada deformabilidade, estes materiais compósitos apresentam um deficiente comportamento ao fogo, o que condiciona consideravelmente a sua aplicação prática, em particular em edifícios (Correia, 2012).

Quando expostos a temperaturas moderadamente elevadas (100-200 °C), os materiais FRP amolecem e as suas propriedades mecânicas (rigidez e resistência) são consideravelmente reduzidas. Quando estes materiais são expostos a temperaturas elevadas (300-500 °C), a matriz polimérica decompõe-se, libertando calor, fumo, fuligem e gases voláteis tóxicos (Correia, 2004). Atualmente, as fibras de vidro do tipo-E são as mais utilizadas no reforço de materiais FRP (80-90% dos produtos comercializados) (Samanta *et al.*, 2004). Estas fibras começam a amolecer e tornam-se viscosas para temperaturas próximas de 830 °C, apresentando uma temperatura de fusão que ronda 1070 °C (Mouritz *et al.*, 2006). Deste modo, é essencialmente a matriz polimérica que condiciona o comportamento dos materiais FRP a temperaturas elevadas.

As propriedades mecânicas (rigidez e resistência) em compressão e corte do material GFRP (mais dependentes da matriz) são mais afetadas pelo aumento da temperatura do que as propriedades em tração (mais dependentes das fibras) (Correia *et al.*, 2013), o que faz com que o colapso de vigas em GFRP ocorra tipicamente por compressão e/ou corte e não por tração. No que diz respeito ao comportamento ao fogo de vigas em GFRP, Ludwig *et al.* (2008) realizaram ensaios de resistência ao fogo em vigas com secção em I (perfis IPE 120 e IPE 160) expostas ao fogo a quatro faces. De modo análogo, Correia *et al.* (2010) avaliaram o desempenho de vigas de GFRP com secção tubular quadrada para uma exposição ao fogo a apenas uma face. Em ambos os estudos, as vigas compósitas eram constituídas por uma matriz polimérica de resina de poliéster e por fibras de vidro do tipo-E, as quais foram expostas ao fogo de acordo com a curva de incêndio padrão definida na norma ISO 834 (1999). Em ambas as campanhas experimentais, foram estudados diferentes sistemas de proteção ao fogo.

Neste artigo apresenta-se um estudo sobre o comportamento ao fogo de vigas em perfis pultrudidos de GFRP. O principal objetivo do programa experimental desenvolvido foi avaliar a resistência ao fogo das vigas de GFRP em função do tipo de exposição ao fogo e dos níveis de carga aplicados, avaliando-se ainda a eficácia de diferentes sistemas de proteção. Com o intuito de simular a evolução das temperaturas na secção de GFRP sujeita a uma situação de incêndio, foi desenvolvido um modelo bidimensional, utilizando o *software* comercial ANSYS FLUENT (ANSYS, 2012), no qual foram consideradas trocas de calor por condução, radiação e convecção, tendo sido considerado o ar no interior da cavidade da secção. Em paralelo, foi ainda desenvolvido um modelo analítico, através do qual foi estimada a evolução da flecha a meio vão de uma viga de GFRP ao longo do tempo de ensaio.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

2.1 Campanha experimental

Nos ensaios de resistência ao fogo foram testados perfis pultrudidos de GFRP, com secção tubular quadrada (100×100×8 mm), produzidos pela empresa *Fiberline*. Este material é constituído por mechas de filamentos contínuos unidireccionais (*rovings*) de fibras de vidro do tipo-E na zona central dos laminados e por duas camadas de mantas de fibras contínuas dispostas aleatoriamente

(*continuous stand mats*), que envolvem a camada central do laminado. O compósito apresenta na sua constituição 69% de material inorgânico e as fibras de vidro encontram-se embebidas por uma matriz de resina de poliéster. Foram realizados ensaios de análise mecânica dinâmica (DMA) ao material GFRP, que mostraram que a sua temperatura de transição vítrea (T_g , determinada a partir do ponto médio da curva do módulo de armazenamento) é de 140 °C. Foram ainda realizados ensaios de calorimetria diferencial de varrimento e termogravimetria (DSC/TGA), nos quais se determinou uma temperatura de decomposição (T_d) do material de aproximadamente 370 °C (Morgado *et al.*, 2013).

Para aumentar a resistência ao fogo das vigas de GFRP analisadas, foram aplicados seis diferentes sistemas de proteção. Os materiais de proteção utilizados nesta campanha experimental foram os seguintes: placas de aglomerado de cortiça (AC), fornecidas pela empresa *Robcork* (25 mm de espessura); placas de lã de rocha (LR), fornecidas pela empresa *Rockwool* (25 mm de espessura); placas de silicato de cálcio (SC), produzidas pela empresa *Promatec* (tipo H, 25 mm de espessura); manta intumescente (MI), fornecida pela empresa *Technical Fibre Products* (Tecnofire 60853A, 2 mm de espessura); e tinta intumescente (TI), fornecida pela *CIN* (C-THERM HB, 2 mm de espessura). Foi ainda utilizado um sistema ativo de proteção por arrefecimento com água (AA), consistindo numa lâmina de água com 8 mm de espessura sobre o banzo inferior e com um caudal de 0.4 m³/h. Na Figura 1 são ilustrados os esquemas de proteção aplicados.

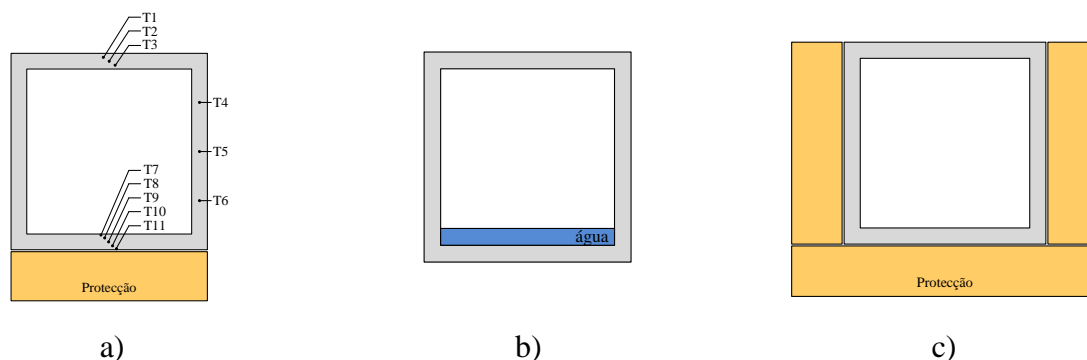


Figura 1. (a) Vigas com proteção passiva expostas a uma face (sendo indicada a posição dos termopares); (b) vigas com proteção ativa expostas a uma/três face(s); e (c) viga com proteção passiva exposta a três faces.

Na presente campanha experimental foram ensaiadas 12 vigas com secção tubular quadrada, agrupadas em três séries experimentais. Na série S1, as vigas foram expostas ao fogo apenas numa face (E1F) e sujeitas a uma carga de serviço equivalente a uma flecha a meio vão de $L/400$ (à temperatura ambiente). Na série S2, as vigas foram expostas ao fogo a três faces (E3F) e sujeitas a uma carga igual à aplicada na primeira série. Na série S3, as vigas também foram expostas ao fogo apenas numa face, tendo sido sujeitas a uma carga equivalente a uma flecha a meio vão de $L/250$ (também a temperatura ambiente). Importa ainda referir que em cada uma das séries foi ensaiada uma viga não protegida (NP), tal como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Campanha experimental.

Série	Número de vigas	Designação das vigas	Exposição ao fogo	Força aplicada [kN]
S1	7	NP-S1, AC-S1, LR-S1, SC-S1, MI-S1, TI-S1, AA-S1	E1F	11.7
S2	3	NP-S2, SC-S2, AA-S2	E3F	11.7
S3	2	NP-S3, SC-S3	E1F	18.7

Os ensaios de resistência ao fogo foram realizados num forno vertical a gás (Figura 2a), com dimensões exteriores de 1.35×1.20×2.10 m (comprimento × largura × altura), que possui uma abertura no topo, permitindo o ensaio de elementos horizontais. Estes ensaios foram realizados adoptando a curva de incêndio padrão definida na norma ISO 834 (1999), apresentada na Figura 3c). Nas séries S1 e S3, as vigas de GFRP foram expostas ao fogo em apenas uma face, enquanto na série S2, as vigas foram expostas ao fogo a três faces, como ilustrado na Figura 2b). Os diferentes tipos de exposição ao fogo foram conseguidos através de um sistema de tampas, constituído por diferentes módulos que permitem a exposição ao fogo a uma ou a três faces. As vigas foram ensaiadas à flexão em quatro pontos com um vão livre entre apoios de 1.3 m, tendo sido aplicadas diferentes cargas em função da série experimental. Como se ilustra na Figura 2a), os pesos utilizados para carregar as vigas foram materializados através de elementos de betão e sacos de cimento.

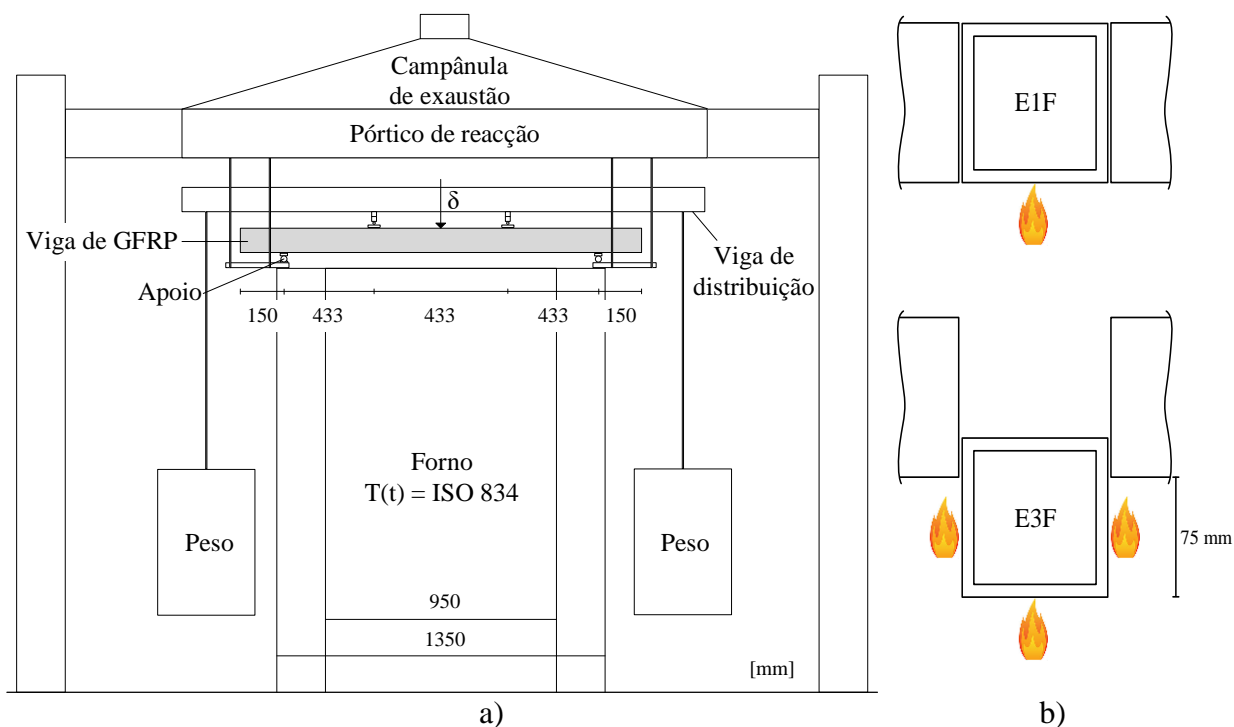


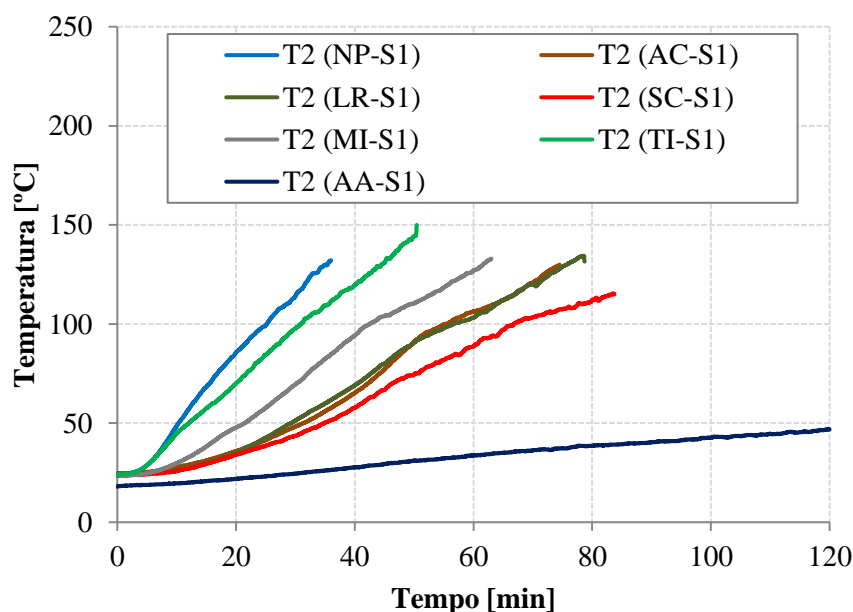
Figura 2. (a) Esquema de ensaio e (b) tipos de exposições testados, a uma face (em cima) e a três faces (em baixo).

As vigas de GFRP foram instrumentadas com termopares do tipo K, através dos quais foi possível registar as temperaturas na secção transversal de meio vão, tendo sido instalados três termopares no banzo superior (T1-T3), três termopares na alma (T4-T6) e cinco termopares no banzo inferior (T7-T11). O posicionamento dos termopares instalados nos banzos superior e inferior foi realizado de modo a obter a evolução das temperaturas ao longo da espessura das paredes, enquanto o

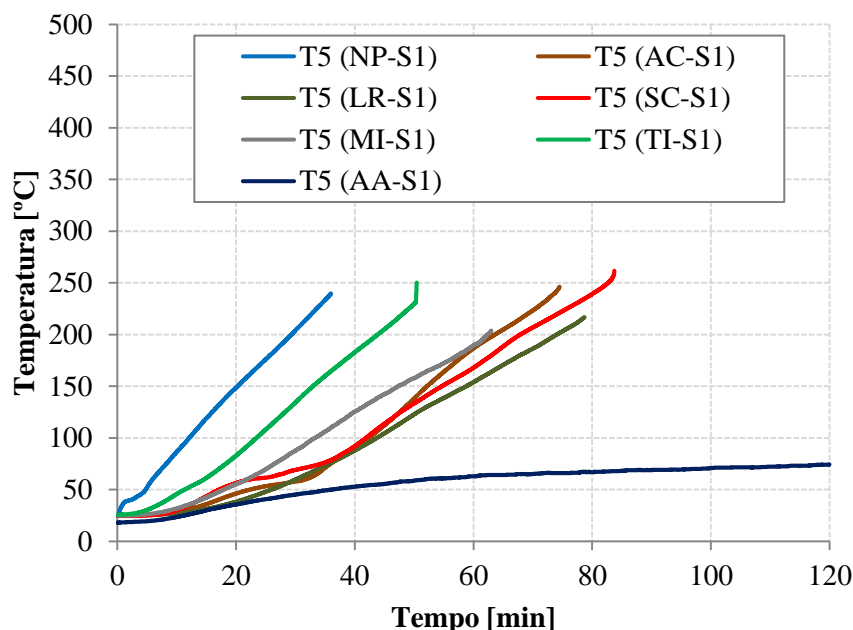
posicionamento dos termopares instalados nas almas foi efetuado de modo a permitir a avaliação das temperaturas ao longo do comprimento da alma, tal como se ilustra na Figura 1a). Após a colocação dos termopares nas posições pretendidas, foram aplicados os respetivos sistemas de proteção. A meio vão das vigas de GFRP foi fixado um defletómetro de fio da marca *TML* (modelo CDP-500), através do qual foi monitorizada a evolução das flechas das vigas.

2.2 Resultados e discussão

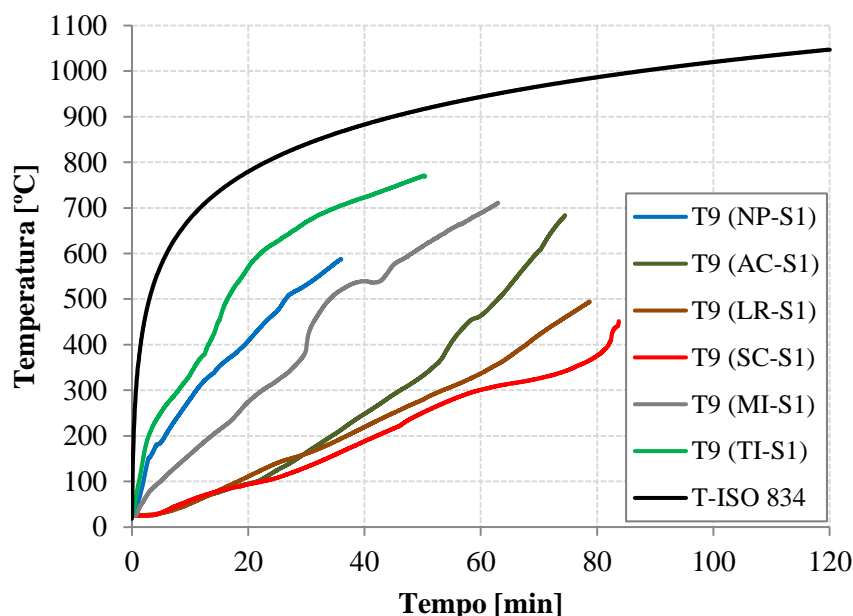
Para avaliar as temperaturas observadas nos diferentes ensaios de resistência ao fogo, foram analisadas e comparadas as temperaturas a meia altura do banzo superior (T2), da alma (T5) e do banzo inferior (T9). Na Figura 3 apresenta-se a evolução das temperaturas registadas nas vigas da série S1. Como esperado, a aplicação de proteções contra o fogo permitiu melhorar o desempenho térmico das vigas de GFRP, *i.e.*, permitiu retardar o aquecimento da secção transversal. De facto, a aplicação de proteções permitiu reduzir significativamente as temperaturas por comparação com a viga não protegida (NP-S1), destacando-se a eficácia das proteções de aglomerado de cortiça, lã de rocha e silicato de cálcio e o arrefecimento com água, tendo este último sistema sido claramente o mais eficiente em proteger a alma e o banzo superior. Importa ainda salientar que, na série S1, o colapso das vigas ocorreu quando a temperatura média no banzo superior se encontrava próxima da temperatura de transição vítrea (T_g) do material GFRP (Figura 3a).



(a) no centro do banzo inferior



(b) a meia altura da alma

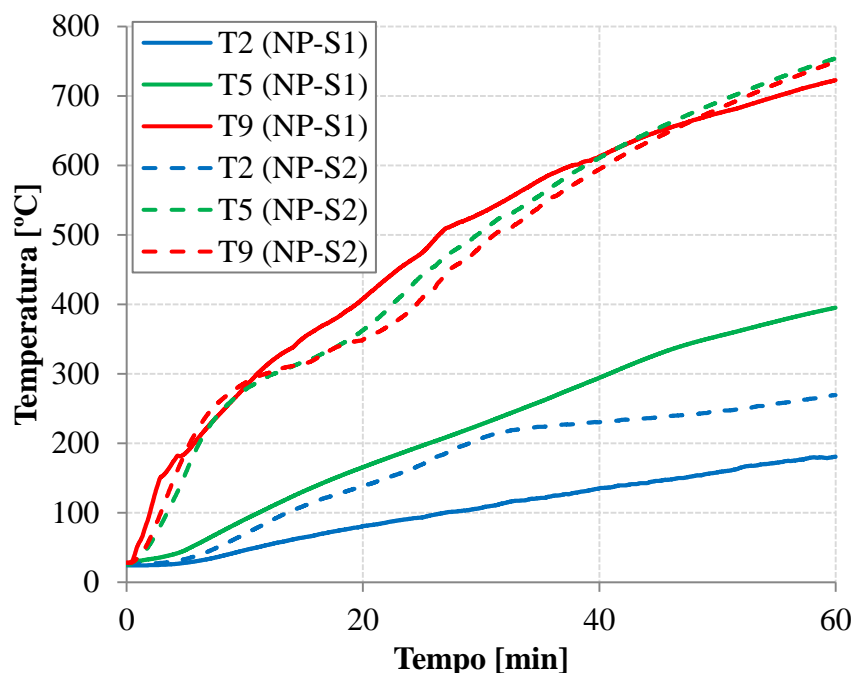


(c) no centro do banzo inferior das vigas da série S1

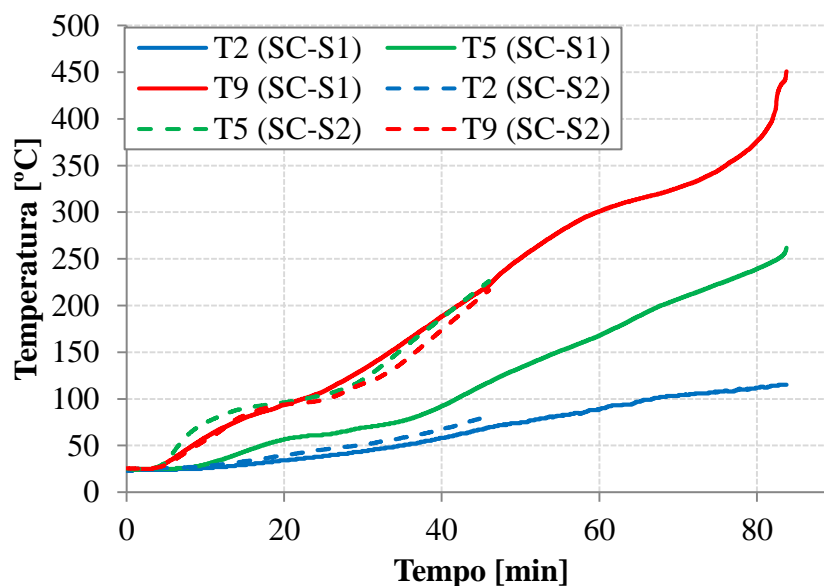
Figura 3. Resposta térmica: temperaturas.

Na Figura 4 apresenta-se a comparação da evolução das temperaturas nas vigas não protegidas e protegidas com silicato de cálcio das séries S1 e S2 (no caso das vigas NP, os valores apresentados foram medidos em perfis auxiliares, não sujeitos a qualquer carregamento; as temperaturas medidas na viga AA-S2 não são apresentadas, pelo facto de a duração deste ensaio ter sido muito reduzida). No caso das vigas da série S2, salienta-se o facto de as curvas de evolução da temperatura das almas e dos banzos inferiores serem muito semelhantes, o que é consistente com o tipo de exposição ao fogo destas vigas (a três faces). Tal como na série S1, a proteção passiva com silicato de cálcio permitiu reduzir significativamente as temperaturas. Nas vigas da série S3, como esperado, a

evolução das temperaturas foi muito semelhante à registada na série S1, pelo facto de a exposição térmica ter sido idêntica (a uma face).



(a) nas vigas NP-S1 e NP-S2



(b) nas vigas SC-S1 e SC-S2.

Figura 4. Resposta térmica: temperaturas registadas.

Na Figura 5a) apresenta-se a variação dos deslocamentos a meio vão das vigas da série S1 em função do tempo de ensaio. Nas vigas sem proteção passiva, durante os instantes iniciais, observou-se um rápido aumento da flecha a meio vão, que estará relacionado com a rápida degradação das propriedades mecânicas do banzo inferior. Após esta fase inicial, a taxa de deformação nestas vigas diminuiu, tendo-se mantido sensivelmente constante até ao final do ensaio, altura em que voltou a

aumentar a uma taxa crescente. Nas vigas com proteção passiva, o aumento da deformação com o tempo (variável para as diferentes proteções) foi menos acentuado, o que estará naturalmente associado ao aquecimento mais lento e gradual da secção transversal e, consequentemente, à menor redução das propriedades mecânicas do material GFRP. No caso da viga com proteção ativa, apesar de o aumento inicial de deformação ter sido relativamente rápido (o que estará associado ao facto de a face inferior do banzo inferior não ter qualquer proteção), a partir de determinada altura, verificou-se uma estabilização da evolução da flecha a meio vão, que passou a apresentar uma taxa de crescimento muito reduzida até ao final da exposição ao fogo. Na Figura 5b) apresenta-se a comparação da variação dos deslocamentos a meio vão das vigas da série S1 com as das séries S2 e S3. Como seria de esperar, para vigas do mesmo tipo, a exposição a três faces (série S2) e o aumento da carga (série S3), provocaram maiores aumentos das deformações.

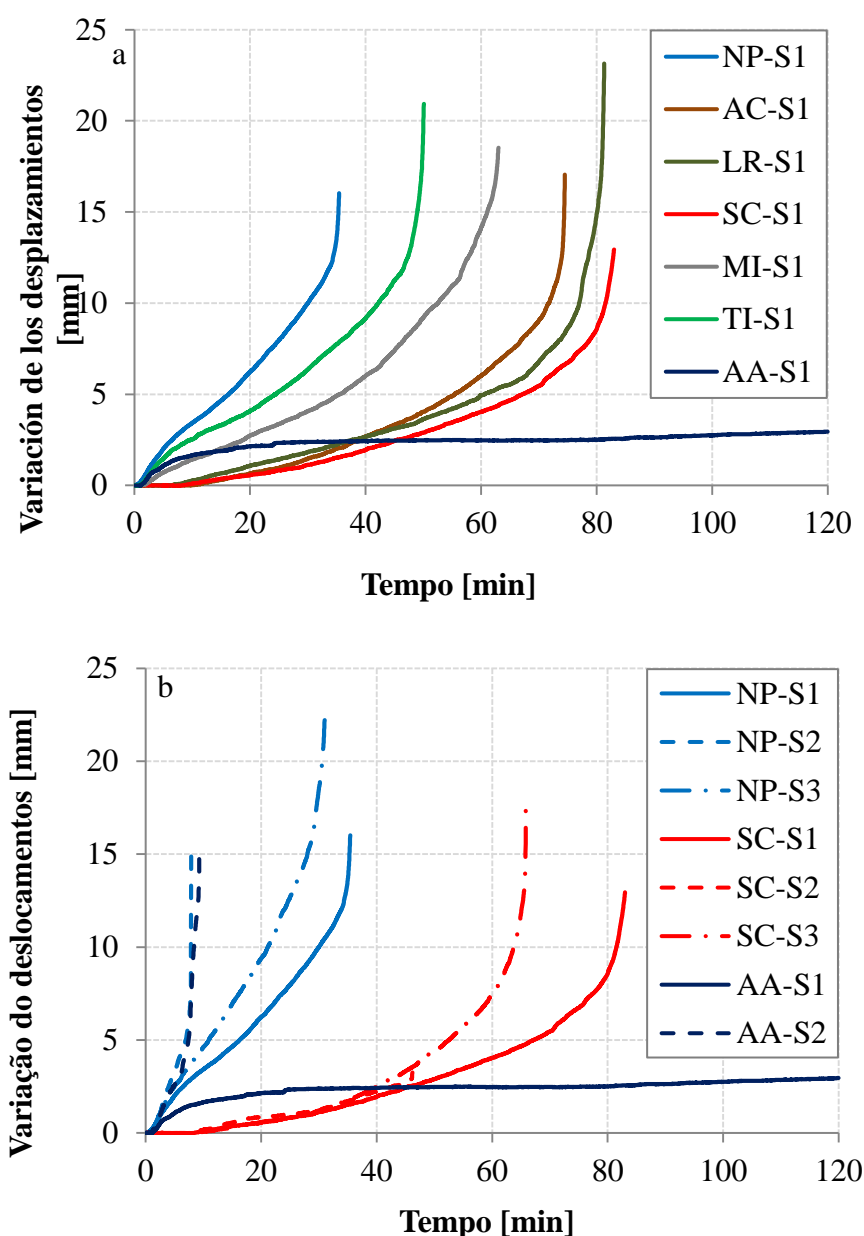


Figura 5. Resposta mecânica: variação dos deslocamentos registados a meio vão das vigas (a) da série S1 e (b) das séries S1, S2 e S3, não protegida (NP), com silicato de cálcio (SC) e arrefecimento com água (AA).

Relativamente aos modos de rotura, todas as vigas colapsaram de um modo frágil e sem qualquer sinal de pré-rotura. A generalidade das vigas colapsou por compressão longitudinal do banzo superior na zona central e/ou por compressão transversal e corte das almas sob um dos pontos de aplicação de carga, como se ilustra na Figura 6. As vigas da série S2 (expostas ao fogo a três faces) não protegida e arrefecida com água parecem ter colapsado por corte/instabilidade das almas, que apresentaram um abaulamento muito significativo em toda a altura. Importa ainda referir que a viga arrefecida com água exposta ao fogo na face inferior (AA-S1) não colapsou durante 120 minutos, altura em que o ensaio foi interrompido. Na Figura 7 é apresentada uma comparação dos tempos de resistência ao fogo das diferentes vigas, salientando-se (i) a eficácia dos diferentes sistemas de proteção, e a redução da resistência ao fogo causada (ii) pela exposição a três faces, sobretudo para o sistema com arrefecimento com água (cuja eficácia é drasticamente reduzida), e (iii) pelo aumento da carga.

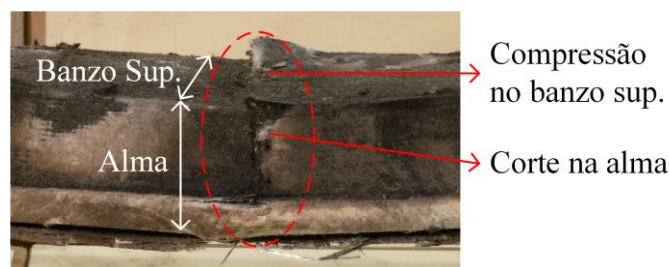


Figura 6. Modo de rotura típico das vigas ensaiadas.

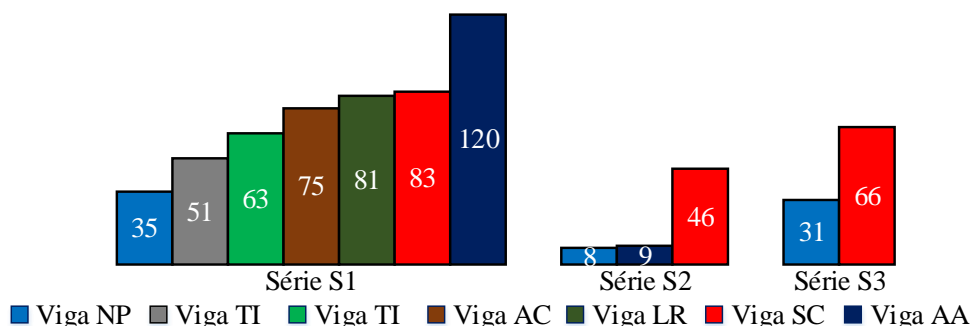


Figura 7. Resistência ao fogo (em min) das vigas ensaiadas.

3. ESTUDO NUMÉRICO

3.1 Modelo numérico

Com o intuito de simular os ensaios de resistência ao fogo realizados, foi desenvolvido um modelo térmico bidimensional para simular a evolução das temperaturas na viga de secção tubular exposta ao fogo a uma face e não protegida (viga NP-S1), através do *software* comercial *ANSYS FLUENT* (ANSYS, 2012). No modelo desenvolvido (Figura 8a) foram consideradas as seguintes hipóteses: (i) o forno transfere calor para o banzo inferior do perfil por radiação ($\epsilon = 0.70$) e convecção ($h = 25 \text{ W/m}^2$); (ii) a transferência de calor no perfil ocorre por condução no material GFRP, mas também por radiação interna ($\epsilon = 0.75$) entre as faces da cavidade do perfil e por convecção do ar nela contido; (iii) as almas são superfícies adiabáticas; e (iv) o banzo superior transfere calor para a atmosfera exterior por convecção ($h = 10 \text{ W/m}^2$) e radiação ($\epsilon = 0.75$).

Quanto à malha adotada para discretizar a secção transversal de $100 \times 100 \times 8 \text{ mm}$, foram usados elementos quadrangulares (*Quad_4*) com 1 mm de lado (para o material sólido e para o fluido - ar), como ilustrado na Figura 8b, o que resultou numa malha com 10 000 elementos e 10 201 nós.

Relativamente às propriedades térmicas (Tabela 2), foram consideradas as seguintes hipóteses: (i) para o ar, considerou-se que a densidade, o calor específico, a condutividade térmica e a viscosidade cinemática variam com a temperatura (Engineering Toolbox, 2015); (ii) para o material GFRP, assumiu-se que a densidade, o calor específico e condutividade térmica variam com a temperatura, de acordo com Bai *et al.* (2007). Foi realizada uma análise transiente com uma duração total de 3600 s, com um intervalo de cálculo (*time step*) de 1 s.

Para além da referida simulação da evolução das temperaturas para uma viga não protegida e exposta ao fogo a uma face (E1F), foi também estimada a resposta térmica de uma viga protegida com silicato de cálcio (SC) para E1F. Para tal, foi apenas necessário alterar a geometria do modelo e adicionar um novo material, sendo que as trocas de calor entre a proteção em SC e o perfil de GFRP ocorrem por condução. As propriedades térmicas do SC (densidade, calor específico e condutividade) foram consideradas como variáveis com a temperatura, de acordo com informação obtida através do fornecedor do material.

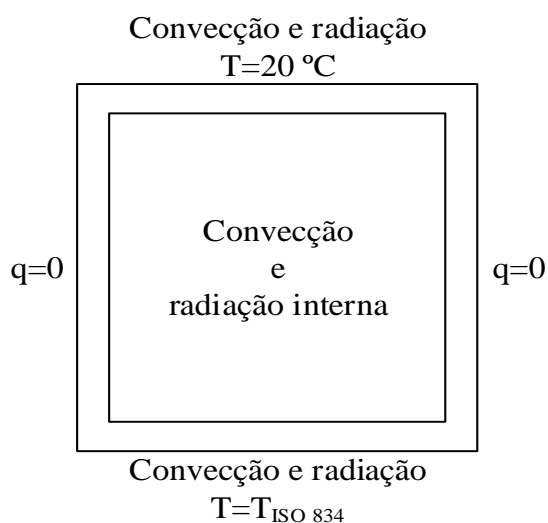


Figura 8. Condições de fronteira no modelo numérico.

Tabela 2. Propriedades térmicas consideradas.

Propriedades	GFRP ⁴ (20-1000 °C)	Ar ⁵ (20-1000 °C)
Densidade [kg/m ³]	1890-1351	1.21-0.28
Calor específico [J/kg.°C]	1053-877	1005-1185
Condutividade [W/m.°C]	0.35-0.10	0.03-0.08
Viscosidade [kg/m.s]	-	1.85-4.79 (×10 ⁻⁵)
⁴ (Engineering Toolbox, 2015), ⁵ (Morgado <i>et al.</i> , 2013)		

3.2 Resultados numéricos vs. experimentais

Na Figura 9 apresenta-se, a título ilustrativo, a distribuição numérica de temperaturas na secção transversal da viga NP-S1 após durante 30 min de exposição ao fogo. Na Figura 10 apresenta-se a comparação das temperaturas experimentais medidas na viga NP-S1 com os correspondentes valores obtidos através do modelo numérico. Constata-se que, globalmente, as curvas numéricas são coerentes com as obtidas experimentalmente, em particular nos banzos superior (T2) e inferior (T9). Os valores consideravelmente mais elevados de temperaturas experimentais medidas na alma (T4, T5 e T6), em especial na sua zona inferior (T5 e T6), poderão estar associados a um eventual

deficiente isolamento lateral da parte inferior das almas, que poderá não ter sido completamente eficaz.

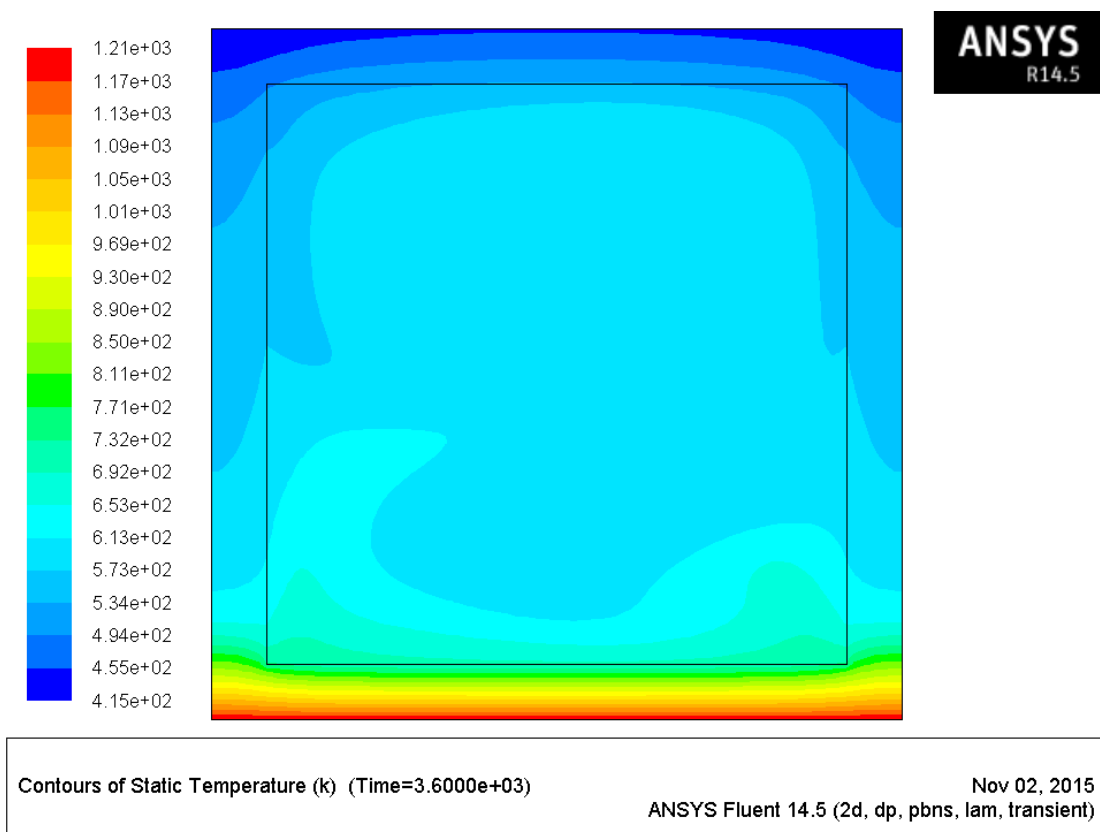


Figura 9. Distribuição numérica de temperaturas da viga NP-S1 (t=60 min).

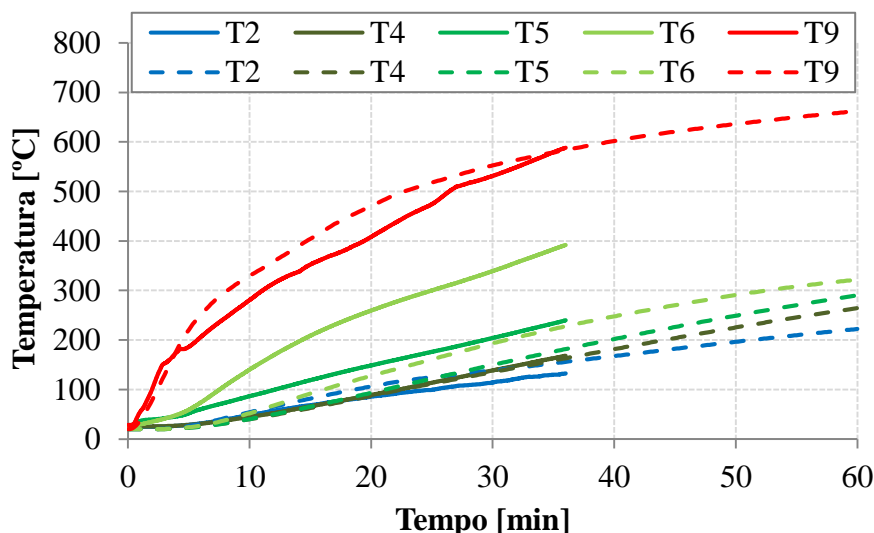


Figura 10. Resposta térmica da viga NP-S1: experimental (a cheio) e numérica (a tracejado).

Quanto à viga protegida com SC, na Figura 11, é apresentada a distribuição de temperaturas na secção. Comparando as temperaturas obtidas experimentalmente com as obtidas numericamente, observou-se que, uma vez mais, as temperaturas numéricas na alma (T4-T6) foram inferiores às experimentais, como ilustrado na Figura 12, o que pode estar relacionado com um eventual

deficiente isolamento lateral do perfil. A evolução das temperaturas numéricas no banzo superior (T2) foi semelhante à das experimentais. Já no banzo inferior (T9), não obstante as temperaturas numéricas e experimentais terem apresentado uma magnitude semelhante, verificaram-se algumas diferenças em termos das tendências de aumento da temperatura (taxas de aumento ao longo do ensaio). Tal parece estar relacionado com as propriedades térmicas consideradas para o SC (fornecidas pelo fabricante), que poderão não reproduzir com suficiente precisão o real comportamento do material.

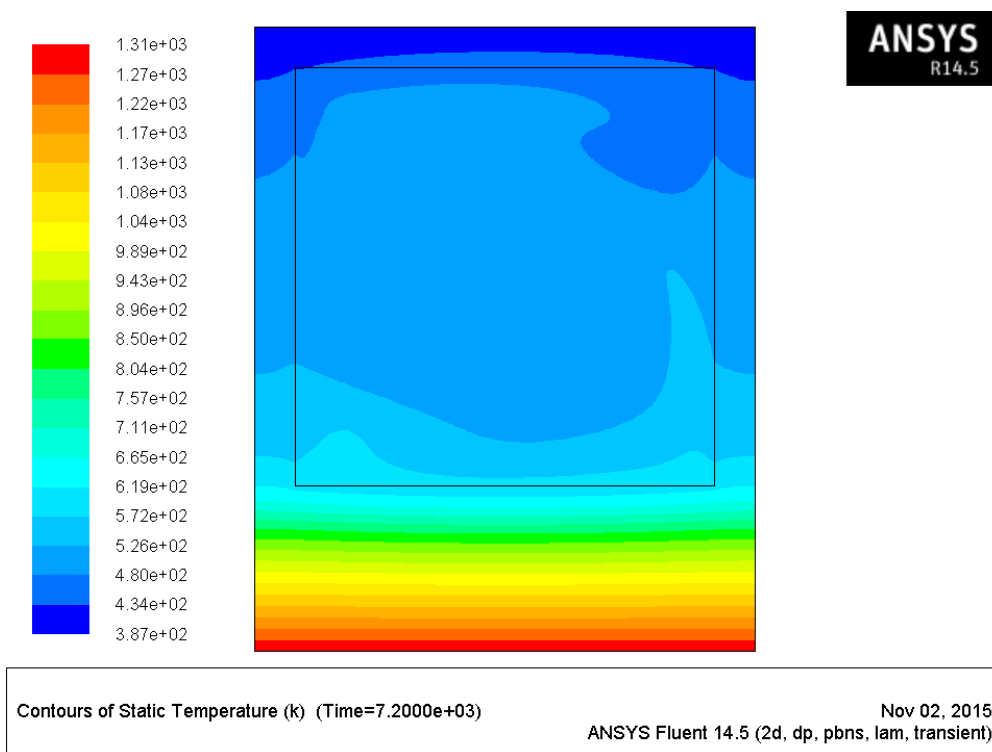


Figura 11. Distribuição numérica de temperaturas da viga SC-S1 (t=60 min).

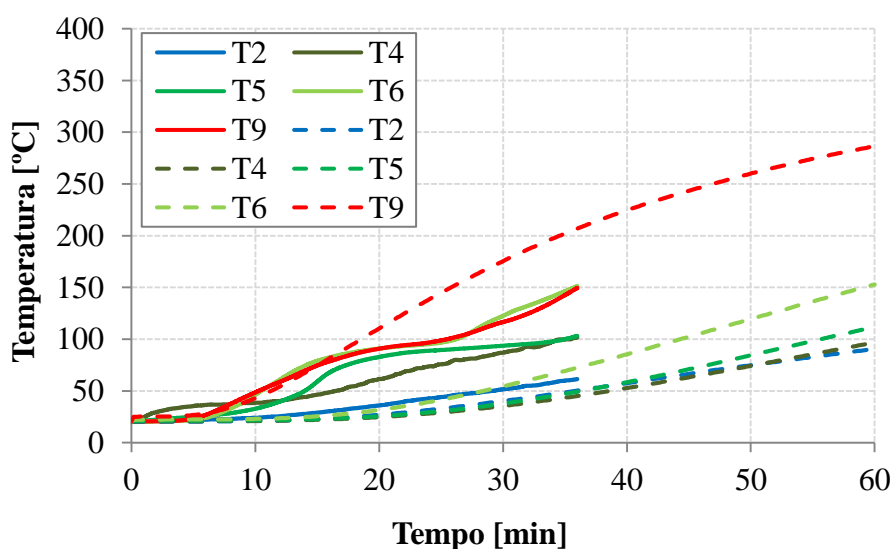


Figura 12. Resposta térmica da viga SC-S1: experimental (a cheio) e numérica (a tracejado).

4. ESTUDO ANALÍTICO

4.1 Modelo analítico

No estudo analítico foi desenvolvido um modelo para simular a resposta mecânica registada nos ensaios de resistência ao fogo, em particular para determinar a evolução dos deslocamentos a meio vão das vigas em função do tempo de exposição ao fogo. O modelo analítico desenvolvido baseia-se (i) numa análise da secção pelo método das fatias, em que, para cada instante de tempo, é considerada a variação das propriedades mecânicas do material GFRP com a temperatura, e (ii) no princípio dos trabalhos virtuais, aplicando a teoria de vigas de Timoshenko (Bank, 2006), isto é, considerando a deformabilidade por flexão e a deformabilidade por corte.

À semelhança do estudo de Mouritz (2003), a secção transversal da viga de GFRP foi dividida em várias camadas, tal como se ilustra na Figura 13. Em seguida, para cada instante de tempo, foi atribuída uma temperatura a cada uma das camadas - essa atribuição pode ser efetuada através dos ensaios experimentais ou do modelo numérico térmico descrito na secção anterior. Com base na temperatura de cada camada, foram determinados os respetivos módulos de elasticidade à compressão (E_C) e à tração (E_T) e o módulo de distorção (G). A variação das referidas propriedades mecânicas em função da temperatura foi estimada com base em ensaios realizados no Instituto Superior Técnico (Correia *et al.*, 2013). Importa ainda referir que, para cada instante de tempo, foi calculada a posição da linha neutra (x_{LN}), através da qual foi calculada a rigidez de flexão equivalente (EI_{eq}) da secção. Para determinar a rigidez de corte ($G_m A_v$), foi calculado um módulo de distorção médio (G_m) para cada instante de tempo. O G_m foi calculado através de uma ponderação entre o módulo de distorção em cada fatia e as áreas das mesmas ($G_m = \sum G_i A_i / \sum A_i$). No que diz respeito à área de corte (A_v), considerou-se que a mesma é constante ($A_v = k \times A$, sendo A a área da secção e k o coeficiente de corte). Uma vez estimados os parâmetros EI_{eq} e $G_m A_v$, o deslocamento (δ) a meio vão da viga é obtido pelo princípio dos trabalhos virtuais, aplicando a equação (1), que, como referido, tem em conta as parcelas de deformação por flexão e de deformação por corte:

$$\delta(t) = \int \frac{M \bar{M}}{EI_{eq}(t)} dx + \int \frac{V \bar{V}}{G_m A_v(t)} dx \quad (1)$$

4.2 Resultados analíticos vs. experimentais

O modelo acima descrito foi aplicado para estimar a evolução dos deslocamentos a meio vão da viga NP-S1, com secção tubular e exposta ao fogo a uma face. Na Figura 14 é apresentada uma comparação entre a variação dos deslocamentos a meio vão medidos no ensaio de resistência ao fogo e os valores correspondentes obtidos através do modelo analítico, considerando as temperaturas medidas experimentalmente (modelo 1) e as calculadas numericamente (modelo 2). Pode-se observar que, globalmente, o modelo analítico desenvolvido forneceu uma boa aproximação aos resultados experimentais, considerando quer as temperaturas medidas experimentalmente (curva mod. 1), quer as temperaturas calculadas numericamente (curva mod. 2). Em ambos os casos, apesar de o modelo ter fornecido variações de deslocamentos ligeiramente inferiores às medidas experimentalmente durante a parte inicial da exposição térmica, o mesmo foi capaz de reproduzir o aumento progressivo de flecha a meio vão antes do colapso e forneceu também estimativas relativamente precisas (dada a complexidade dos fenómenos envolvidos) da resistência ao fogo experimental (35 min) da viga - 30 min (modelo 1) e 31 min (modelo 2). Salienta-se o facto de as curvas analíticas representadas na Figura 14 apresentarem um andamento menos regular do que a experimental, sobretudo no modelo 1. Tal deve-se (i) ao número finito de camadas consideradas e, sobretudo (ii) às variações das diferentes propriedades mecânicas do material GFRP

com a temperatura considerada nos modelos, que apresentam valores constantes para determinados intervalos de temperatura (Correia *et al.*, 2013). No caso do modelo 1, acresce ainda o facto de ter sido considerado um menor número de temperaturas do que no modelo 2.

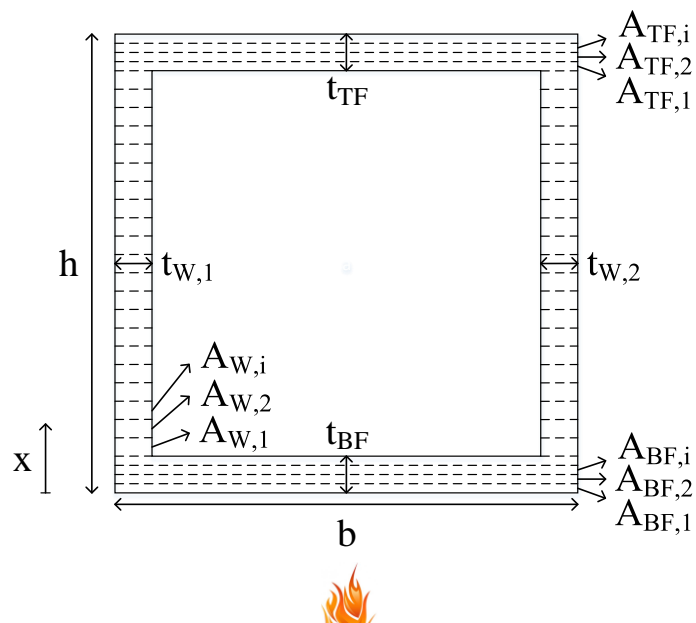


Figura 13. Modelo analítico: discretização da secção em camadas.

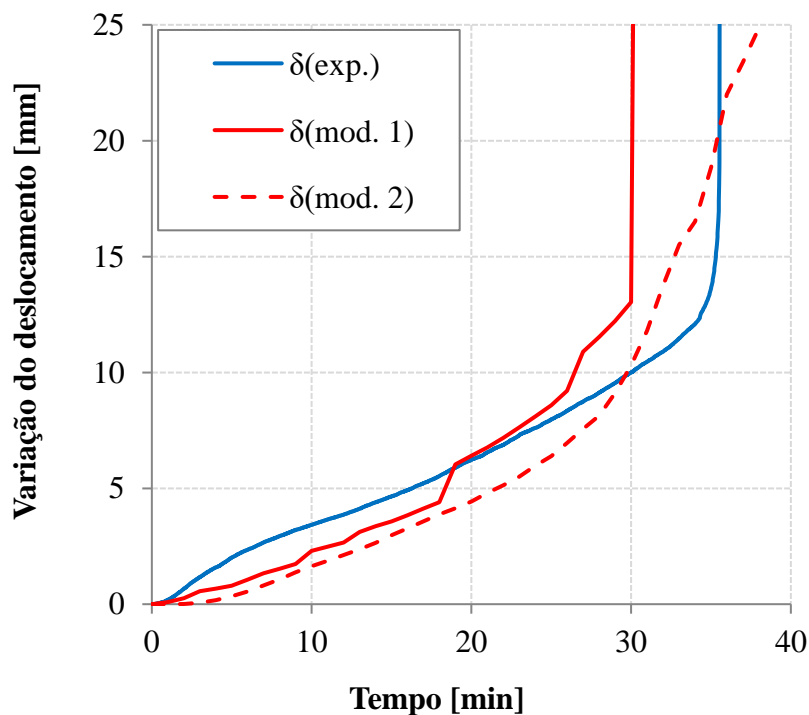


Figura 14. Resposta mecânica: resultados experimentais e analíticos para a viga NP-S1.

5. CONCLUSÕES

A campanha experimental mostrou que os diferentes sistemas de proteção permitiram melhorar consideravelmente o comportamento ao fogo das vigas de GFRP. Observou-se que os materiais de proteção mais eficazes foram o aglomerado de cortiça, a lã de rocha e o silicato de cálcio. Importa ainda referir que, para a exposição apenas a uma face, a solução de arrefecimento com água foi claramente a mais eficaz, tendo o respetivo tempo de resistência ao fogo sido superior a 120 minutos. Mostrou-se também que a exposição a três faces e o aumento da carga de serviço provocaram reduções significativas do tempo de resistência ao fogo. Os ensaios experimentais realizados permitiram ainda confirmar que os perfis pultrudidos de GFRP, quando expostos a temperaturas elevadas, são mais vulneráveis à compressão e ao corte do que à tração. De facto, na maior parte dos ensaios, o colapso das vigas ocorreu por compressão longitudinal do banzo superior e/ou por compressão e corte das almas. As vigas sem proteção passiva expostas ao fogo a três faces apresentaram um mecanismo de colapso por corte com abaulamento das almas.

O modelo numérico térmico (bidimensional), desenvolvido no *software* comercial *ANSYS FLUENT*, permitiu avaliar a distribuição de temperaturas nas vigas expostas ao fogo a uma face, não protegida e protegida com SC. Neste modelo foram consideradas as trocas de calor entre o sólido (GFRP e SC) e o ambiente exterior (por radiação e convecção), as trocas de calor entre o sólido e o ar (fluido) no interior da cavidade por convecção e ainda as trocas de calor por radiação entre as paredes internas da secção. Obteve-se uma razoável a boa concordância entre as curvas experimentais e numéricas referentes à temperatura dos banzos superior e inferior. Relativamente às almas, registaram-se diferenças significativas, que poderão ser explicadas por um deficiente isolamento lateral entre o perfil de GFRP e as tampas do forno.

O modelo analítico desenvolvido permitiu estimar a evolução dos deslocamentos a meio vão da viga não protegida exposta ao fogo a uma face. Neste modelo, a secção transversal da viga foi dividida em camadas, às quais foram atribuídas diferentes temperaturas em função do tempo de exposição ao fogo e, conseqüentemente, diferentes propriedades mecânicas em tração, compressão e corte. Para cada instante de tempo, as flechas a meio vão foram calculadas através da teoria de vigas de Timoshenko. Obteve-se uma boa concordância entre a variação dos deslocamentos com o tempo e estimativas relativamente precisas dos tempos de resistência ao fogo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FCT (projeto PTDC/ECM/100779/2008) e ao ICIST pelo financiamento da investigação. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer à FCT pela bolsa de doutoramento SFRH/BD/94907/2013.

7. REFERÊNCIAS

- Correia, J. R. (2012), “*Materiais compósitos de matriz polimérica*”, em Ciência e Engenharia dos Materiais de Construção, IST Press, Lisboa.
- Correia, J. R. (2004), “*Perfis pultruidos de polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP). Aplicação de vigas mistas GFRP betão na construção*”, Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Samanta, A. *et al.* (2004), “*Thermo mechanical assessment of polymer composites subjected to fire*”, The Robert Gordon University, Aberdeen.
- Mouritz, A. P., Gibson, A. G. (2006), “*Fire properties of polymer composite materials*”, Springer, Dordrecht.

- Correia, J. R. *et al.* (2013), “*Mechanical behaviour of pultruded glass fibre reinforced polymer composites at elevated temperature: Experiments and model assessment*”, *Composites Structures*, V. 98, pp. 303-313.
- Ludwig, C. *et al.* (2008), “*Thermal and Thermo mechanical Investigation of Polyester based Composite Beams*”, Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Zurich.
- Correia, J. R. *et al.* (2010), “*Fire protection system for building floors made of pultruded GFRP profiles. Part 1: Experimental investigations*”, *Composites: Part B*, V. 41, pp. 617-629.
- ISO 834-1 (1999), “*Fire resistance tests. Elements of building construction - Part 1: General requirements*”, International Standards Organization, Genève.
- Software comercial *ANSYS FLUENT*, ANSYS, inc, versão 14.2, (2012).
- Morgado, T. *et al.* (2013), “*Comportamento ao fogo de vigas de compósito de GFRP*”, *Revista Internacional Construlink*, n.º 32, pp. 4-19.
- Website, http://www.engineeringtoolbox.com/dry-air-properties-d_973.html, (2015).
- Bai, Y., Vallé, T., Keller, T. (2007), “*Modeling of thermos physical properties for FRP composites under elevated and high temperature*”, *Composites Science and Technology*, V. 67, pp. 3098-3109.
- Bank, L. C. (2006), “*Composites for construction: Structural design with FRP materials*”, Wiley, Hoboken.
- Mouritz, A. (2003), “*Simple models for determining the mechanical properties of burnt FRP composites*”, *Materials and Engineering*, V. 359, pp. 237-246.