



Resistencia al fuego de perfiles pultruidos de polímero reforzado con fibras de vidrio (GFRP) para aplicaciones en rehabilitación: Estudio experimental, numérico y 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.

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.

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.

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.

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

1. INTRODUCCIÓN

Los polímeros reforzados con fibras (FRP) están siendo cada vez más utilizados en aplicaciones de la ingeniería civil por presentar diversas ventajas en relación a los materiales tradicionalmente utilizados en este sector, citando al peso propio reducido, elevada resistencia, buenas propiedades de aislamiento térmico, cuotas de mantenimiento reducidos y excelente durabilidad. A pesar de tener un comportamiento frágil y elevada deformabilidad, estos materiales compuestos presentan un deficiente comportamiento al fuego, lo que condiciona considerablemente su aplicación práctica, en particular en edificios (Correia, 2012).

Cuando los materiales FRP están expuestos a temperaturas moderadamente elevadas (100-200 °C), se reblandecen y sus propiedades mecánicas (rigidez y resistencia) son considerablemente reducidas. Cuando estos materiales son expuestos a temperaturas elevadas (300-500 °C), la matriz polimérica se descompone, liberando calor, humo, hollín y gases volátiles tóxicos (Correia, 2004). Actualmente, las fibras de vidrio del tipo-E son las más utilizadas en el refuerzo de materiales FRP (80-90% de los productos comercializados) (Samanta *et al.*, 2004). Estas fibras comienzan a ablandarse y se vuelven viscosas para temperaturas próximas de 830 °C, presentando una temperatura de fusión que ronda 1070 °C (Mouritz *et al.*, 2006). De este modo, es esencialmente la matriz polimérica que condiciona el comportamiento de los materiales FRP a temperaturas elevadas.

Las propiedades mecánicas (rigidez y resistencia) en compresión y corte del material GFRP (más dependientes de la matriz) son más afectadas por el aumento de la temperatura que las propiedades en tracción (más dependientes de las fibras) (Correia *et al.*, 2013), lo que hace el colapso de vigas en GFRP ocurra típicamente por compresión y/o corte y no por tracción. En lo que respecta al comportamiento al fuego de vigas en GFRP, Ludwig *et al.* (2008) realizaron ensayos de resistencia al fuego en vigas con sección en I (perfiles IPE 120 e IPE 160) expuestas al fuego en cuatro etapas. De modo análogo, Correia *et al.* (2010) evaluaron el desempeño de vigas de GFRP con sección tubular cuadrada para una exposición al fuego de apenas una etapa. En ambos estudios, las vigas compuestas eran constituidas por una matriz polimérica de resina de poliéster y por fibras de vidrio del tipo-E, las cuales fueron expuestas al fuego de acuerdo con la curva de incendio patrón definida en la norma ISO 834 (1999). En ambos procedimientos experimentales, fueron estudiados diferentes sistemas de protección al fuego.

En este artículo se presenta un estudio sobre el comportamiento al fuego de vigas en perfiles pultruidos de GFRP. El principal objetivo del programa experimental desarrollado fue evaluar la resistencia al fuego de las vigas de GFRP en función del tipo de exposición al fuego y dos niveles de carga aplicados, evaluando la eficacia de diferentes sistemas de protección. Con intuito de simular la evolución de las temperaturas en la sección de GFRP sujeta a una situación de incendio, fue desarrollado un modelo bidimensional, utilizando el *software* comercial *ANSYS FLUENT* (ANSYS, 2012), en el cual fueron considerados cambios de calor por conducción, radiación y convección, considerando el aire en el interior de la cavidad de la sección. En paralelo, fue desarrollado un modelo analítico, a través del cual fue estimada la evolución de la flecha a mitad del vano de una viga de GFRP a lo largo del tiempo de ensayo.

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

2.1 Procedimiento experimental

En los ensayos de resistencia al fuego fueron evaluados perfiles pultruidos de GFRP, con sección tubular cuadrada (100×100×8 mm), producidos por la empresa *Fiberline*. Este material es constituido por fibras de filamentos continuos unidireccionales (*rovings*) de fibras de vidrio del

tipo-E en la zona central de los laminados y por dos capas de mantas de fibras continuas dispuestas aleatoriamente (*continuous stand mats*), que envuelven la capa central del laminado. El compuesto presenta en su constitución 69% de material inorgánico y las fibras de vidrio están embebidas por una matriz de resina de poliéster. Fueron realizados ensayos de análisis mecánico dinámica (DMA) al material GFRP, que mostraron que su temperatura de transición vítrea (T_g , determinada a partir del punto medio de la curva del módulo de almacenamiento) es de 140 °C. Fueron además realizados ensayos de calorimetría diferencial de barrido y termo gravimetría (DSC/TGA), en los cuales se determinó una temperatura de descomposición (T_d) del material de aproximadamente 370 °C (Morgado *et al.*, 2013).

Para aumentar la resistencia al fuego de las vigas de GFRP analizadas, fueron aplicados seis diferentes sistemas de protección. Los materiales de protección utilizados en este procedimiento experimental fueron los siguientes: placas de aglomerado de corcho (AC), provenientes de la empresa *Robcork* (25 mm de espesor); placas de Lana de roca (LR), facilitadas por empresa *Rockwool* (25 mm de espesor); placas de silicato de calcio (SC), producidas por la empresa *Promatec* (tipo H, 25 mm de espesor); manta absorbente (MI), entregadas por empresa *Technical Fibre Products* (Tecnofire 60853A, 2 mm de espesor); y tinta absorbente (TI), de la *CIN* (C-THERM HB, 2 mm de espesor). Fue además utilizado un sistema activo de protección por enfriamiento con agua (AA), que consiste en una lámina de agua de 8 mm de espesor sobre la parte inferior y con un caudal de 0.4 m³/h. En la Figura 1 son ilustrados los esquemas de protección aplicados.

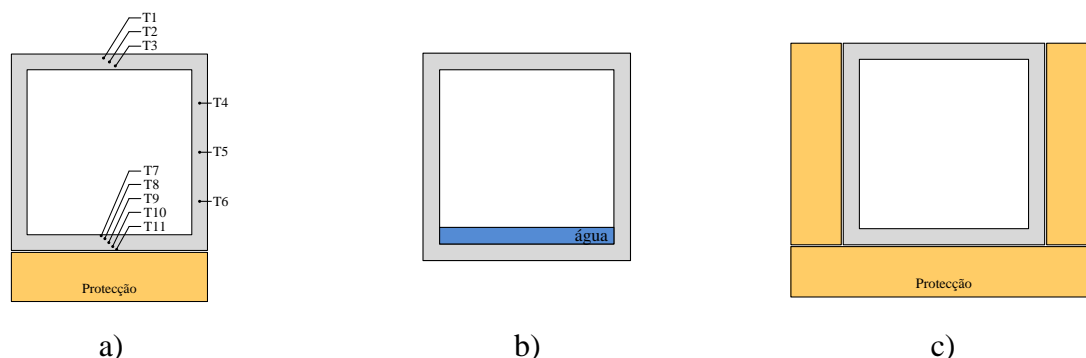


Figura 1. (a) Vigas con protección pasiva expuestas a una cara (siendo indicada la posición de los termopares); (b) vigas con protección activa expuestas a un tercio de cara(s); e (c) viga con protección pasiva expuesta en las tres caras.

En el presente procedimiento experimental fueron ensayados 12 vigas con sección tubular cuadrada, agrupadas en tres series experimentales. En la serie S1, las vigas fueron expuestas al fuego apenas en una cara (E1F) y sujetas a una carga de servicio equivalente a una flecha a mitad del vano de $L/400$ (temperatura ambiente). En la serie S2, las vigas fueron expuestas al fuego en las tres caras (E3F) y sujetas a una carga igual a la aplicada en la primera serie. En la serie S3, las vigas también fueron expuestas al fuego apenas en una cara, siendo sujetas a una carga equivalente a una flecha a medio vano de $L/250$ (también la temperatura ambiente). Importa también referir que en cada una de las series fue ensayada una viga no protegida (NP), tal como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Procedimiento experimental.

Serie	Número de vigas	Designación de las vigas	Exposición al fuego	Fuerza 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

Los ensayos de resistencia al fuego fueron realizados en un horno vertical a gas (Figura 2a), con dimensiones exteriores de 1.35×1.20×2.10 m (largo × ancho × altura), que posee una abertura en el tope, permitiendo el ensayo de elementos horizontales. Estos ensayos fueron realizados adoptando la curva de incendio patrón definida en la norma ISO 834 (1999), presentada en la Figura 3c). En las series S1 y S3, las vigas de GFRP fueron expuestas al fuego en apenas una cara, entre tanto en la serie S2, las vigas fueron expuestas al fuego a tres caras, como lo ilustra en la Figura 2b). Los diferentes tipos de exposición al fuego fueron conseguidos a través de un sistema de tapas, constituido por diferentes módulos que permiten la exposición al fuego en una o a tres caras. Las vigas fueron ensayadas a flexión en cuatro puntos con el vano libre entre apoyos de 1.3 m, siendo aplicadas diferentes cargas en función de la serie experimental. Como se ilustra en la Figura 2a), los pesos utilizados para cargar las vigas fueron materializados a través de elementos de concreto y sacos de cemento.

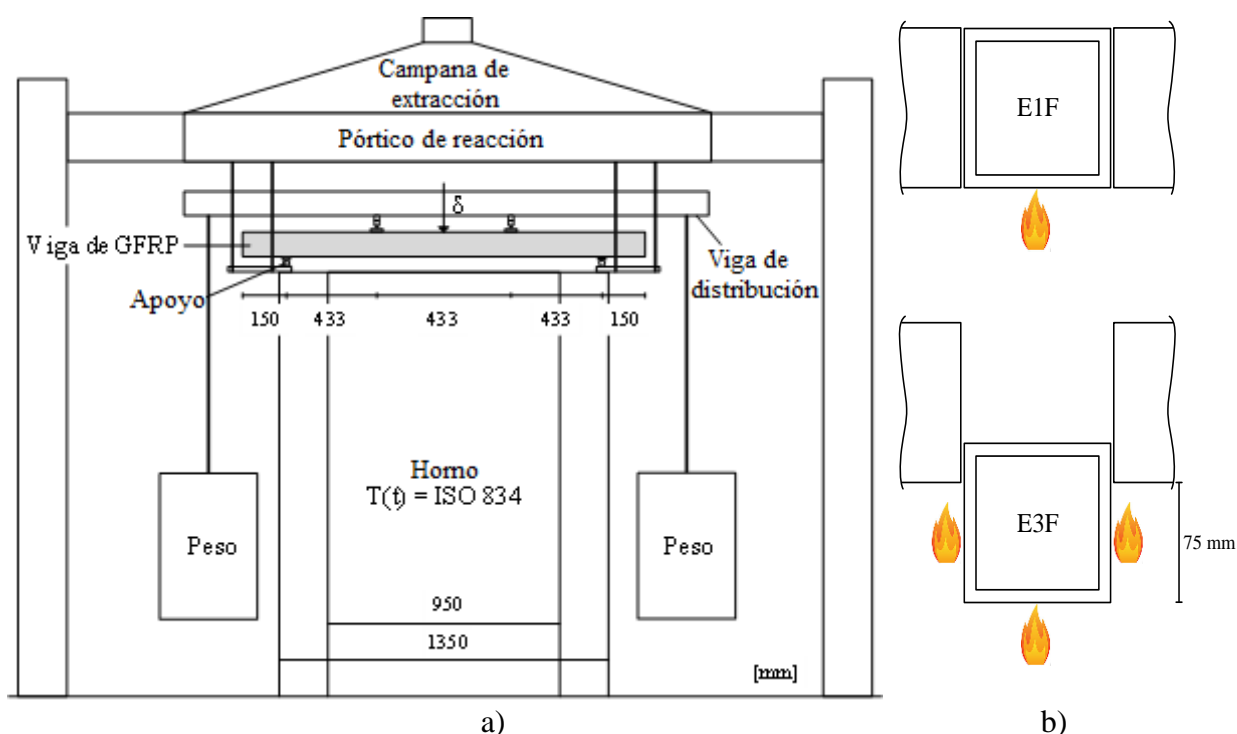


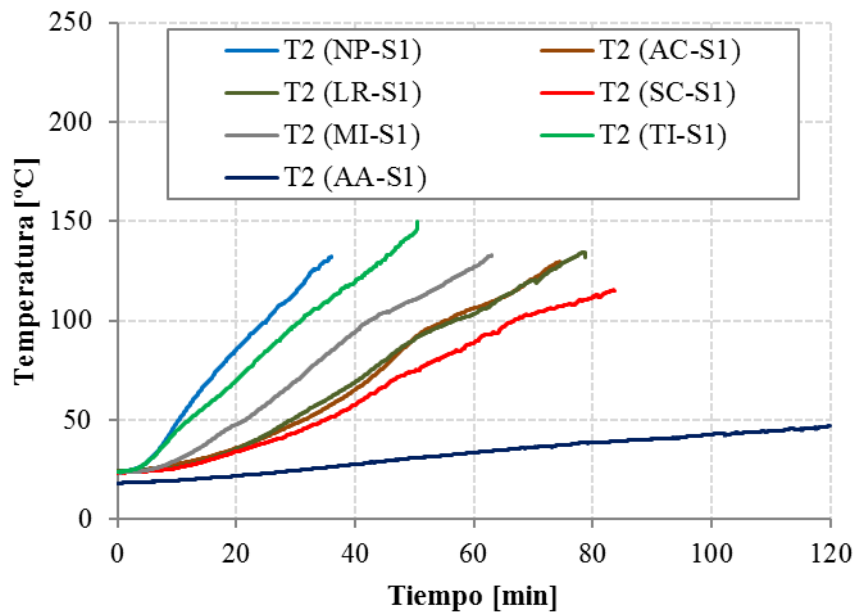
Figura 2. (a) Esquema de ensayo e (b) tipos de exposiciones probados, a una cara (sobre) y en las tres caras (abajo).

Las vigas de GFRP fueron instrumentadas con termopares do tipo K, a través de los cuales fue posible registrar las temperaturas en la sección transversal a mitad del vano, siendo instalados tres termopares en la cara superior (T1-T3), tres termopares en el alma (T4-T6) y cinco termopares en la cara (T7-T11). El posicionamiento de los termopares instaladas en las caras superior e inferior

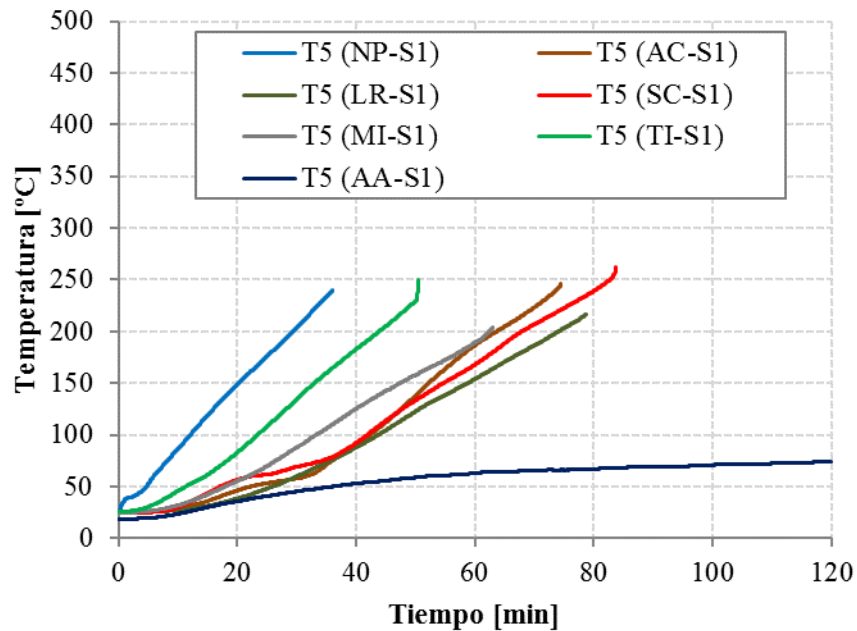
fue realizado de modo de obtener la evolución de las temperaturas a lo largo del espesor de las paredes, en cuanto a la posición de los termopares instalados en las almas fue colocado de modo que permita la evaluación de las temperaturas a lo largo del alma, tal como se ilustra en la Figura 1a). Posterior a la colocación de los termopares en las posiciones pretendidas, fueron aplicados los respectivos sistemas de protección. A mitad del vano de las vigas de GFRP fue fijado un deflectómetro de hilo de marca *TML* (modelo CDP-500), a través del cual se monitoreo la evolución de las flechas de las vigas.

2.2 Resultados y discusión

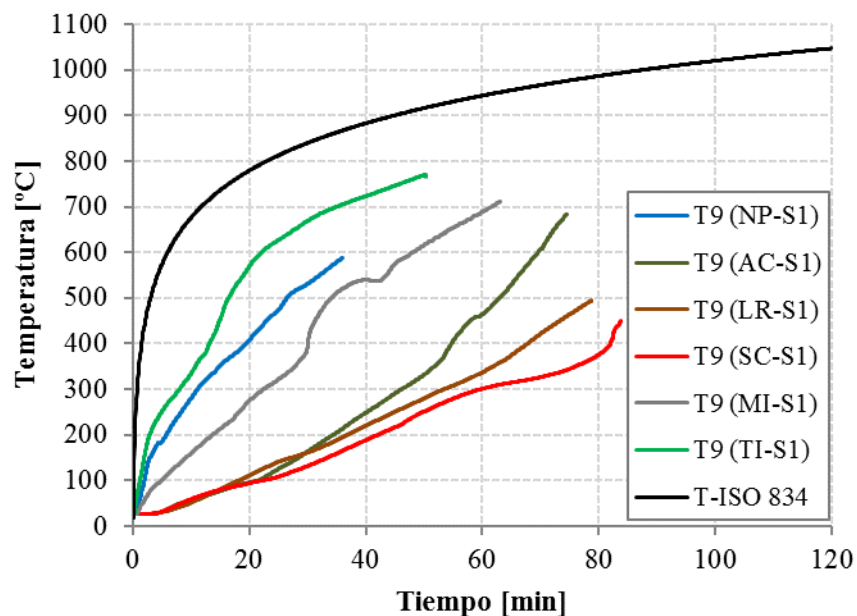
Para evaluar las temperaturas observadas en los diferentes ensayos de resistencia al fuego, fueron analizadas y comparadas las temperaturas a media altura de la cara superior (T2), del alma (T5) y de la cara inferior (T9). En la Figura 3 se presenta la evolución de las temperaturas registradas en las vigas de la serie S1. Como era esperado, la aplicación de protecciones contra el fuego permitió mejorar el desempeño térmico de las vigas de GFRP, *i.e.*, permitió retardar el calentamiento de la sección transversal. De hecho, la aplicación de protecciones permitió reducir significativamente las temperaturas por comparación con la viga no protegida (NP-S1), destacando la eficacia de las protecciones de aglomerado de corcho, lana de roca y silicato de calcio y el enfriamiento con agua, siendo este último sistema el más eficiente en proteger el alma y la cara superior. Es importante destacar que, en la serie S1, el colapso de las vigas ocurrió cuando la temperatura promedio de la cara superior se encontraba próxima de la temperatura de transición vítrea (T_g) del material GFRP (Figura 3a).



(a) En el centro de la cara inferior



(b) A media altura del alma

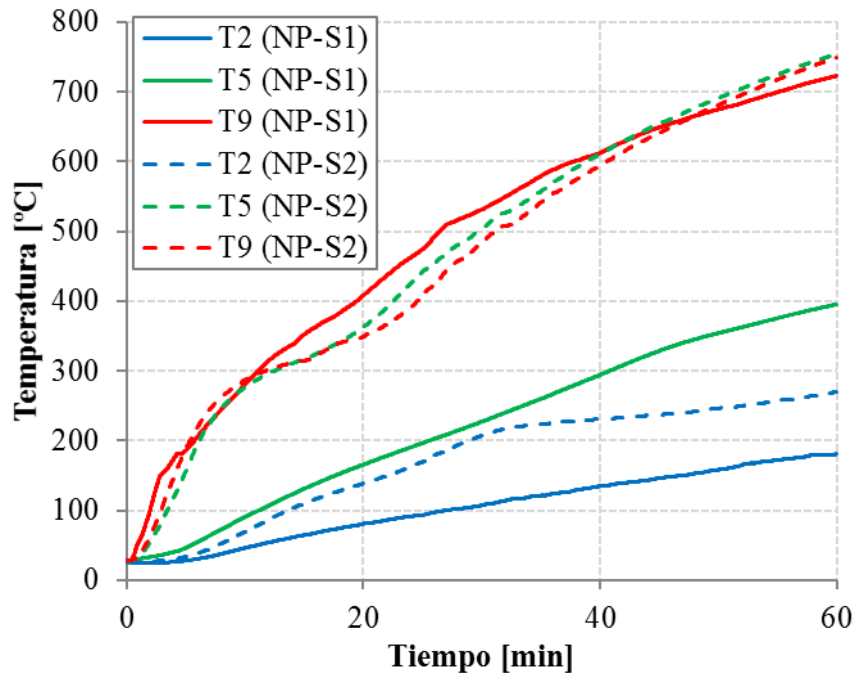


(c) En el centro de la cara inferior de las vigas de la serie S1

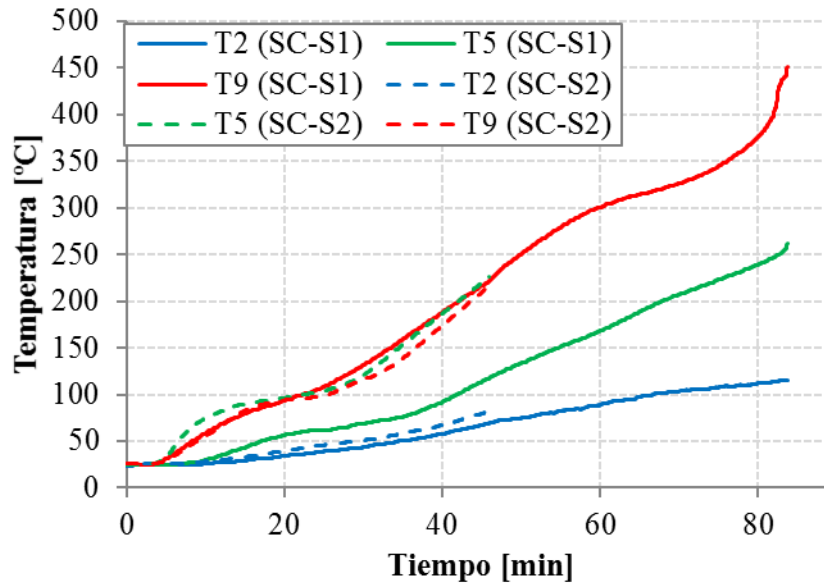
Figura 3. Respuesta térmica: temperaturas.

En la Figura 4 se presenta la comparación de la evolución de las temperaturas en las vigas no protegidas y protegidas con silicato de calcio de las series S1 y S2 (en el caso de las vigas NP, los valores presentados fueron medidos en perfiles auxiliares, no sujetos a cualquier carga; las temperaturas medidas en la viga AA-S2 no son presentadas, por el hecho de la duración de este ensayo ser muy corto). En el caso de las vigas de la serie S2, sobresale el hecho de las curvas de evolución de temperatura de las almas y las caras inferiores ser muy semejantes lo que concuerda con el tipo de exposición al fuego de estas vigas (a tres caras). Tal como en la serie S1, la protección pasiva con silicato de calcio permitió reducir significativamente las temperaturas. En

las vigas de la serie S3, como se esperaba, la evolución de las temperaturas fue muy semejante a la registrada en la serie S1, por el hecho de la exposición térmica haber sido idéntica (a una cara).



(a) En las vigas NP-S1 e NP-S2



(b) En las vigas SC-S1 e SC-S2.

Figura 4. Respuesta térmica: temperaturas registradas.

En la Figura 5a) se presenta la variación de los desplazamientos a mitad del vano de las vigas de la serie S1 en función del tiempo de ensayo. En las vigas sin protección pasiva, durante los instantes iniciales, se observó un rápido aumento de la flecha a mitad del vano, que estará relacionado con la rápida degradación de las propiedades mecánicas de la cara inferior. Posterior a esta fase inicial, el rango de deformación en estas vigas disminuyó, manteniéndose sensiblemente constante hasta el final del ensayo, altura en que volvió a aumentar a una tendencia creciente. En las vigas con

protección pasiva, el aumento de la deformación con el tiempo (variable para las diferentes protecciones) fue menos acentuado, lo que estará naturalmente asociada al calentamiento más lento y gradual de la sección transversal y, consecuentemente, a menor reducción de las propiedades mecánicas del material GFRP. En el caso de la viga con protección activa, a pesar del aumento inicial de deformación haber sido relativamente rápido (lo que estará asociado al hecho de la cara inferior no tener ninguna protección), a partir de cierta altura, se verificó una estabilización de la evolución de la flecha a mitad del vano, que paso a presentar una rata de crecimiento muy reducida hasta el final de la exposición al fuego. En la Figura 5b) se presenta la comparación de la variación de los desplazamientos a mitad del vano de las vigas de la serie S1 con las de las series S2 y S3. Como era de esperarse, para vigas del mismo tipo, la exposición a tres caras (serie S2) y el aumento de la carga (serie S3), provocaron mayores aumentos de las deformaciones.

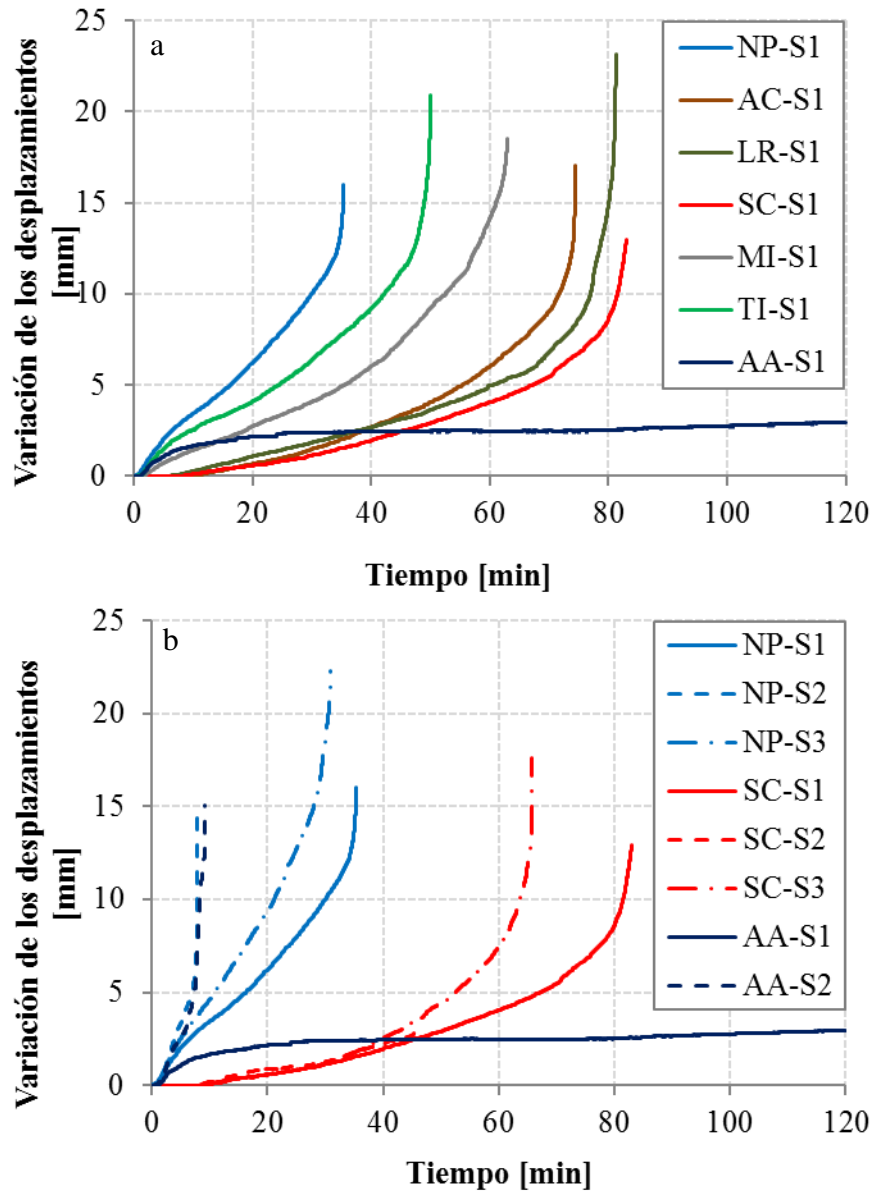


Figura 5. Respuesta mecánica: variación de los desplazamientos registrados a mitad del vano de las vigas (a) de la serie S1 y (b) de las series S1, S2 y S3, no protegida (NP), con silicato de calcio (SC) y enfriada con agua (AA).

Relativamente a los modos de rotura, todas las vigas colapsaron de un modo frágil y sin ninguna señal de pre rotura. La generalidad de las vigas colapsó por compresión longitudinal de la parte superior en la zona central y/o por compresión transversal y corte de las almas sobre uno de los puntos de aplicación de carga, como se ilustra en la Figura 6. Las vigas de la serie S2 (expuestas al fuego a tres caras) no protegida y enfriado con agua parecen haber colapsado por corte/inestabilidad de las almas, que presentaron un arqueado muy significativo en toda la altura. Además, se refiere que la viga enfriada con agua expuesta al fuego en la cara inferior (AA-S1) no colapsó durante 120 minutos, altura en que el ensayo fue interrumpido. En la Figura 7 es presentada una comparación de los tiempos de resistencia al fuego de las diferentes vigas, resaltando (i) la eficacia de los diferentes sistemas de protección, y la reducción de la resistencia al fuego causada (ii) por exposición a tres caras, sobre todo para el sistema con enfriamiento con agua (cuya eficacia es drásticamente disminuida), y (iii) por el aumento da carga.

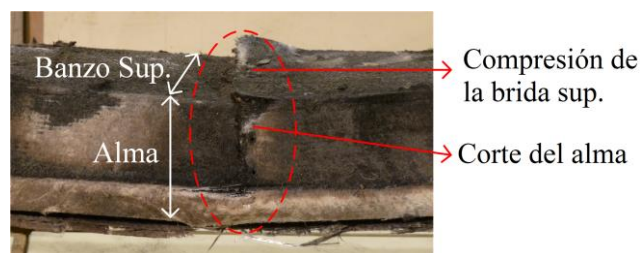


Figura 6. Modo de rotura típico de las vigas ensayadas.

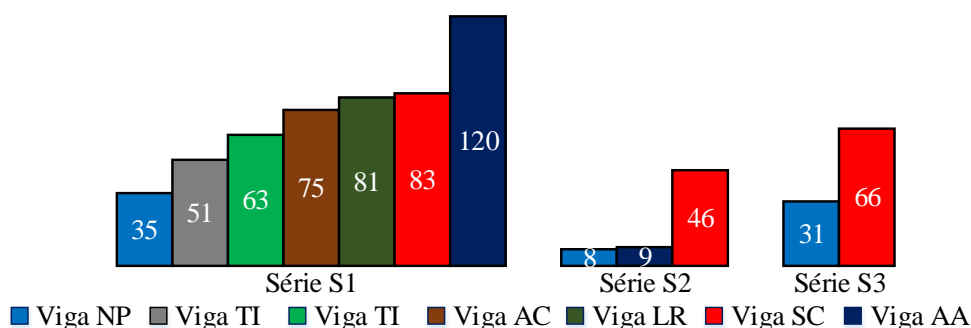


Figura 7. resistencia al fuego (en min) de las vigas ensayadas.

3. ESTUDIO NUMÉRICO

3.1 Modelo numérico

Con la intención de simular los ensayos de resistencia al fuego realizados, se desarrolló un modelo térmico bidimensional para simular la evolución de las temperaturas en la viga de sección tubular expuesta al fuego a una cara y no protegida (viga NP-S1), a través del *software* comercial *ANSYS FLUENT* (ANSYS, 2012). En el modelo desarrollado (Figura 8a) fueron consideradas las siguientes hipótesis: (i) el horno transfiere calor para la parte inferior del perfil por radiación ($\epsilon = 0.70$) y convección ($h = 25 \text{ W/m}^2$); (ii) la transferencia de calor en el perfil ocurre por conducción en el material GFRP, y también por radiación interna ($\epsilon = 0.75$) entre las caras de la cavidad del perfil y por convección del aire contenido; (iii) las almas son superficies adiabáticas; y (iv) la parte superior transfiere calor para la atmósfera exterior por convección ($h = 10 \text{ W/m}^2$) y radiación ($\epsilon = 0.75$).

Cuando la malla adoptada para discretizar la sección transversal de $100 \times 100 \times 8 \text{ mm}$, fueron usados elementos cuadrangulares (*Quad_4*) con 1 mm de lado (para el material sólido y para el

fluido aire), como se ilustra en la Figura 8b, lo que resultó en una malla con 10 000 elementos y 10 201. Relativamente las propiedades térmicas (Tabla 2), fueron consideradas las siguientes hipótesis: (i) para el aire, se consideró que la densidad, el calor específico, la conductividad térmica y la viscosidad cinemática varía con la temperatura (Engineering Toolbox, 2015); (ii) para el material GFRP, se asumió que la densidad, el calor específico y conductividad térmica varían con la temperatura, de acuerdo con Bai *et al.* (2007). Fue realizado un análisis con una duración total de 3600 s, con un intervalo de cálculo (*time step*) de 1 s.

Para además de la referida simulación de la evolución de las temperaturas para una viga no protegida y expuesta al fuego a una cara (E1F), fue también estimada la respuesta térmica de una viga protegida con silicato de calcio (SC) para E1F. Para tal, fue apenas necesario alterar la geometría del modelo y adicionar un nuevo material, siendo que los intercambios de calor entre la protección en SC y del perfil de GFRP ocurren por conducción. Las propiedades térmicas del SC (densidad, calor específico y conductividad) fueron consideradas como variables con la temperatura, de acuerdo con información obtenida a través del facilitador del material. convección y radiación

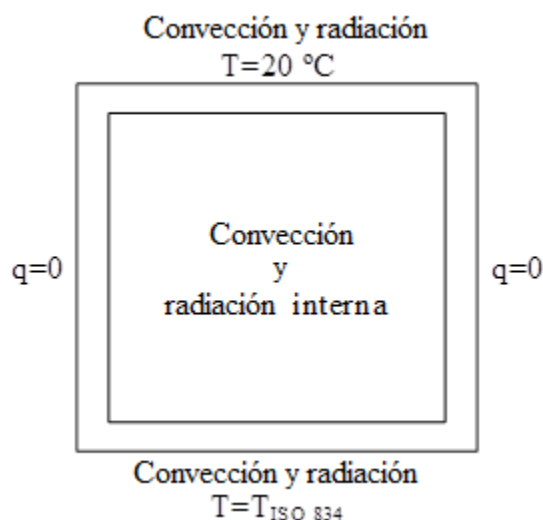


Figura 8. Condiciones de frontera en el modelo numérico.

Tabla 2. Propiedades térmicas consideradas.

Propiedades	GFRP ⁴ (20-1000 °C)	Ar ⁵ (20-1000 °C)
Densidad [kg/m ³]	1890-1351	1.21-0.28
Calor específico [J/kg.°C]	1053-877	1005-1185
Conductividad [W/m.°C]	0.35-0.10	0.03-0.08
Viscosidad [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. experimentales

En la Figura 9 se presentan, a título ilustrativo, la distribución numérica de temperaturas en la sección transversal de la viga NP-S1 posterior y durante 30 min de exposición al fuego. En la Figura 10 se presenta la comparación de las temperaturas experimentales medidas en la viga NP-S1 con los correspondientes valores obtenidos a través del modelo numérico. Se constata que, globalmente, las curvas numéricas son coherentes con las obtenidas experimentalmente, en particular en las partes superiores (T2) e inferiores (T9). Los valores considerablemente más elevados de temperaturas experimentales medidas en el alma (T4, T5 y T6), en especial en su zona

inferior (T5 y T6), podrán estar asociados a un eventual deficiente aislamiento lateral de la parte inferior de las almas, que podrá no haber ter sido completamente eficaz.

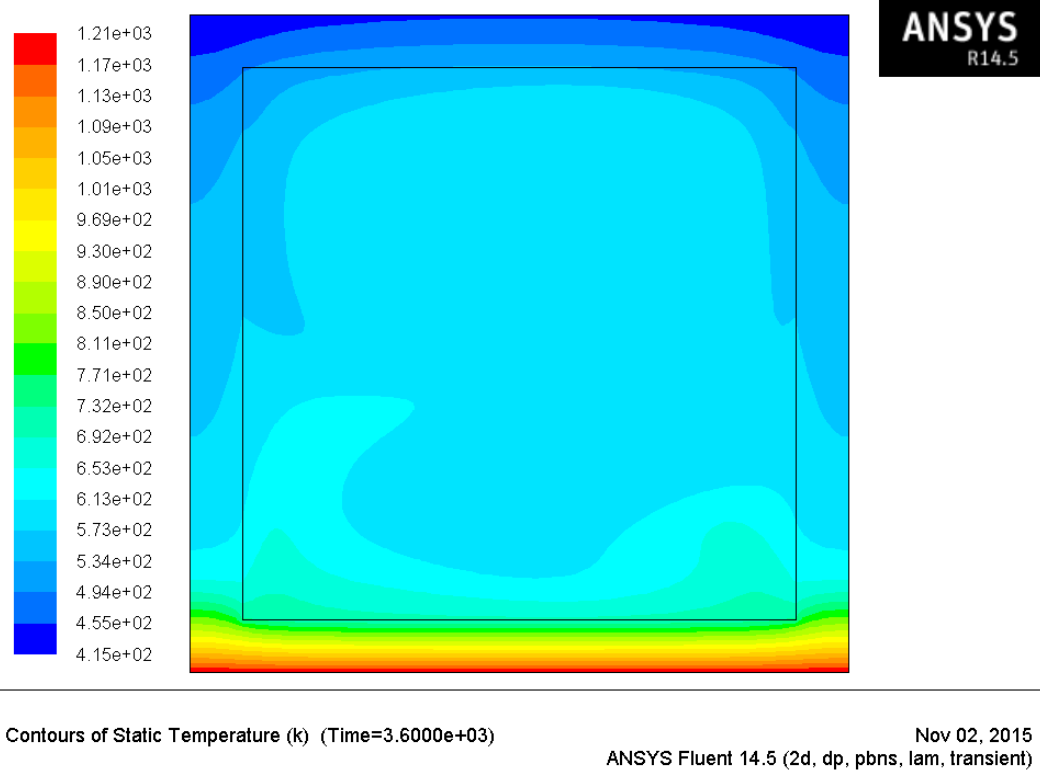


Figura 9. Distribución numérica de temperaturas de la viga NP-S1 (t=60 min).

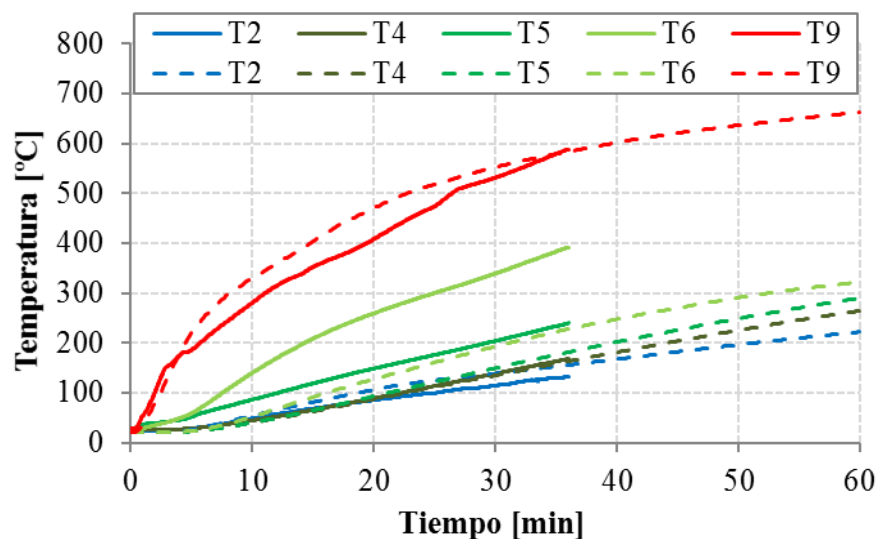


Figura 10. Respuesta térmica de la viga NP-S1: experimental (relleno) y la numérica (punteada).

En la viga protegida con SC, en la Figura 11, es presentada la distribución de temperaturas en la sección. Comparando las temperaturas obtenidas experimentalmente con las obtenidas numéricamente, se observó que, una vez más, las temperaturas numéricas en el alma (T4-T6) fueron inferiores a las experimentales, como se ilustra en la Figura 12, lo que se puede relacionar con un eventual deficiente aislamiento lateral del perfil. La evolución de las temperaturas

numéricas en la cara banzo superior (T2) fue semejante a las experimentales. En la cara inferior (T9), no obstante, las temperaturas numéricas y experimentales presentaron una magnitud semejante, se observan algunas diferencias en términos de las tendencias de aumento de la temperatura (tasa de aumento a lo largo del ensayo). Tal parece estar relacionado con las propiedades térmicas consideradas para el SC (facilitadas por el fabricante), que podrán no reproducir con suficiente precisión el real comportamiento del material.

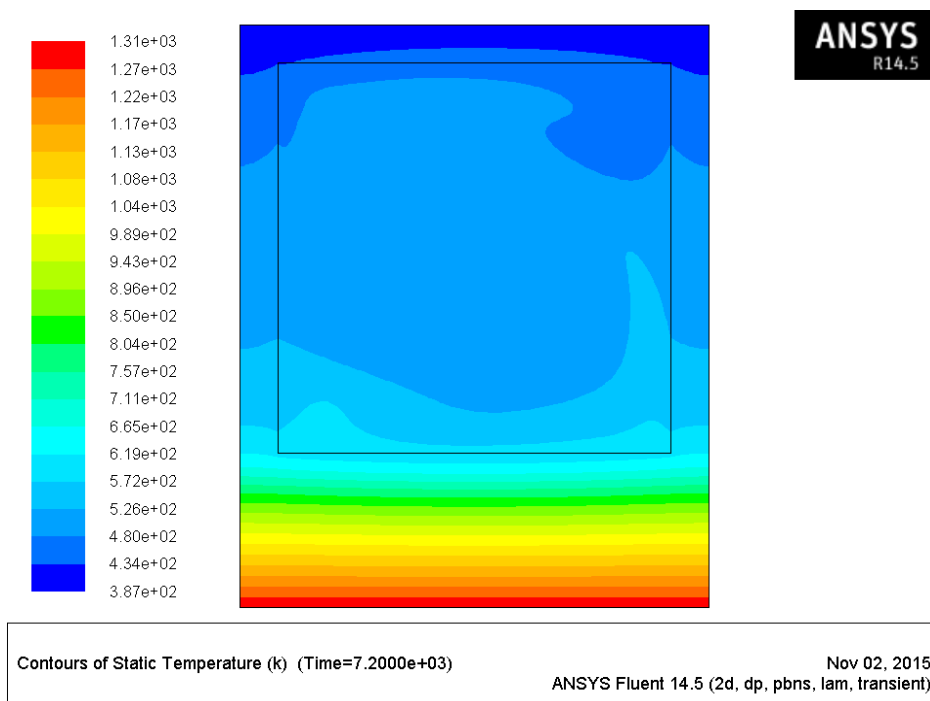


Figura 11. Distribución numérica de temperaturas de la viga SC-S1 (t=60 min).

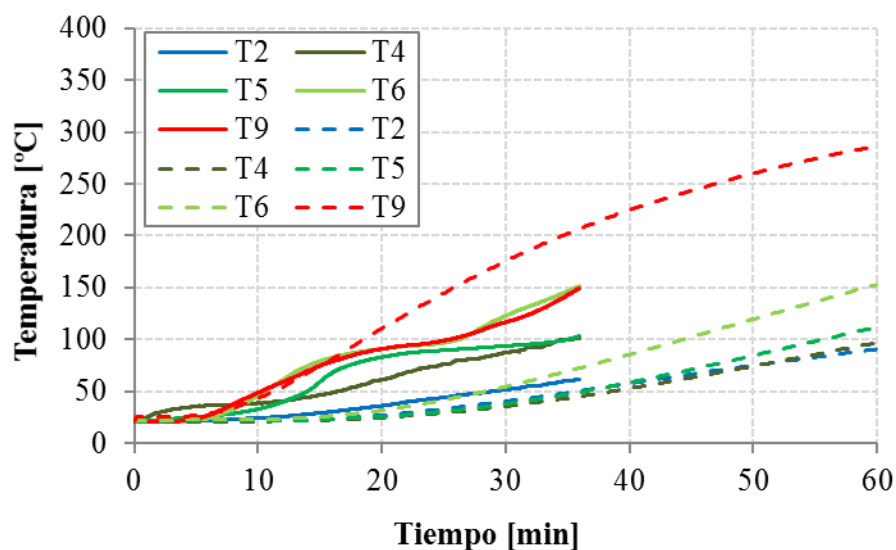


Figura 12. Respuesta térmica de la viga SC-S1: experimental (relleno) y numérica (punteado).

4. ESTUDIO ANALÍTICO

4.1 Modelo analítico

En el estudio analítico fue desarrollado un modelo para simular la respuesta mecánica registrada en los ensayos de resistencia al fuego, en particular para determinar la evolución de los desplazamientos a mitad del vano de las vigas en función del tiempo de exposición al fuego. El modelo analítico desarrollado se basa (i) en un análisis de la sección por el método de las rebanadas, en que, para cada instante de tiempo, es considerada la variación de las propiedades mecánicas del material GFRP con la temperatura, y (ii) en el principio de los trabajos virtuales, aplicando la teoría de vigas de Timoshenko (Bank, 2006), es decir, considerando la deformabilidad por flexión y la deformabilidad por corte.

La semejanza del estudio de Mouritz (2003), la sección transversal de la viga de GFRP fue dividida en varias capas, tal como se ilustra en la Figura 13. Seguidamente, para cada instante de tiempo, fue atribuida una temperatura a cada una de las capas, esa atribución puede ser efectuada a través de los ensayos experimentales o del modelo numérico térmico descrito en la sección anterior. Con base en la temperatura de cada capa, fueron determinados los respectivos módulos de elasticidad y compresión (E_C) y la tracción (E_T) y el módulo de distorsión (G). La variación de las referidas propiedades mecánicas en función de la temperatura fue estimada con base en ensayos realizados en el Instituto Superior Técnico (Correia *et al.*, 2013). Es importante referir que, para cada instante de tiempo, fue calculada la posición del eje neutro (x_{LN}), a través del cual fue calculada la rigidez de flexión equivalente (EI_{eq}) de la sección. Para determinar la rigidez de corte ($G_m A_v$), fue calculado un módulo de distorsión promedio (G_m) para cada instante de tiempo. O G_m fue calculado a través de una ponderación entre el módulo de distorsión en cada rebanada y las áreas de las mismas ($G_m = \sum G_i A_i / \sum A_i$). En lo referente al área de corte (A_v), se consideró que la misma es constante ($A_v = k \times A$, siendo A el área de la sección y k el coeficiente de corte). Una vez estimados los parámetros EI_{eq} y $G_m A_v$, el desplazamiento (δ) a mitad del vano de la viga se obtiene por el principio de los trabajos virtuales, aplicando la ecuación (1), que, tiene en cuenta las parcelas de deformación por flexión y de deformación 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. experimentales

El modelo antes descrito fue aplicado para estimar la evolución de los desplazamientos a mitad del vano de la viga NP-S1, con sección tubular y expuesta al fuego en una cara. En la Figura 14 es presentada una comparación entre la variación de los desplazamientos a mitad del vano medidos en el ensayo de resistencia al fuego y los valores correspondientes obtenidos a través del modelo analítico, considerando las temperaturas medidas experimentalmente (modelo 1) y las calculadas numéricamente (modelo 2). Se puede observar que, globalmente, el modelo analítico desarrollado ofreció una buena aproximación a los resultados experimentales, considerando que las temperaturas medidas experimentalmente (curva mod. 1), y que las temperaturas calculadas numéricamente (curva mod. 2). En ambos casos, a pesar del modelo haber ofrecido variaciones de desplazamientos ligeramente inferiores a las medidas experimentalmente durante la parte inicial de la exposición térmica, el mismo fue capaz de reproducir el aumento progresivo de la flecha a mitad del vano antes del colapso y presentó también estimativas relativamente precisas (dada la complejidad de los fenómenos que intervinieron) en la resistencia al fuego experimental (35 min) de la viga - 30 min (modelo 1) y 31 min (modelo 2). Sobresale el hecho de que las curvas

analíticas representadas en la Figura 14 presentan un desarrollo menos regular que el experimental, sobretodo en el modelo 1. Eso se debe (i) al número finito de capas consideradas y, sobretodo (ii) a las variaciones de las diferentes propiedades mecánicas del material GFRP con la temperatura considerada en los modelos, que presentan valores constantes para determinados intervalos de temperatura (Correia *et al.*, 2013). En el caso del modelo 1, acrecienta aún el hecho de haber sido considerado un menor número de temperaturas que en el modelo 2.

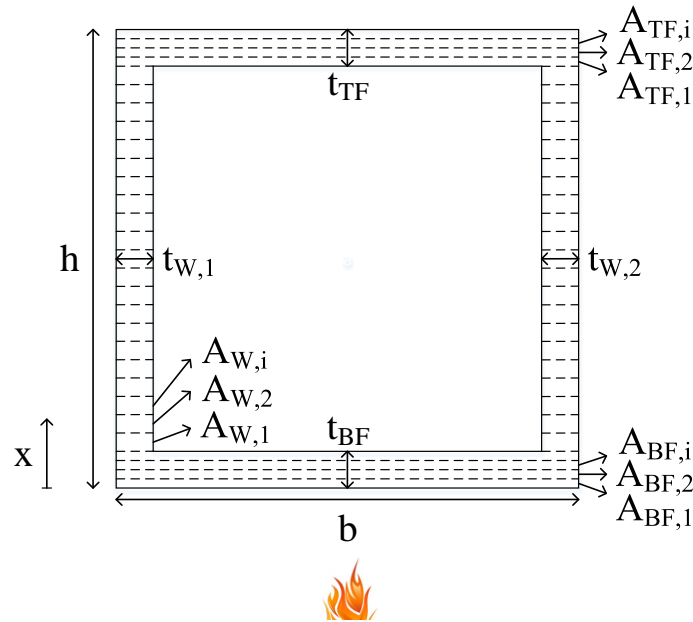


Figura 13. Modelo analítico: discretización de la sección en capas.

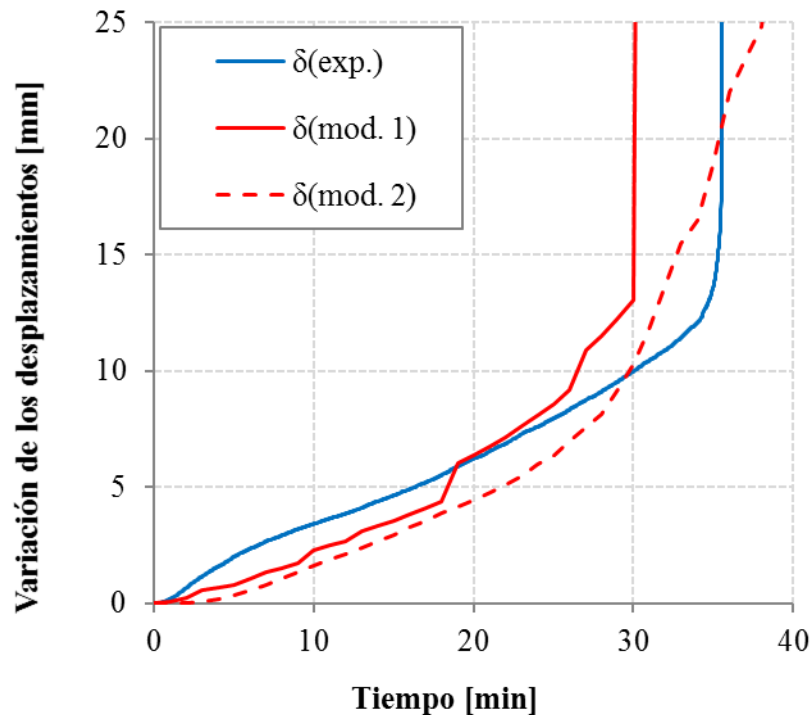


Figura 14. Respuesta mecánica: resultados experimentales y analíticos para la viga NP-S1.

5. CONCLUSIONES

El procedimiento experimental mostró que los diferentes sistemas de protección permitieron mejorar considerablemente el comportamiento al fuego de las vigas de GFRP. Se observó que los materiales de protección más eficaces fueron el aglomerado de corcho, la lana de roca y el silicato de calcio. Importa referir que, para la exposición apenas a una cara, la solución de enfriamiento con agua fue claramente la más eficaz, siendo el tiempo de resistencia al fuego superior a 120 minutos. Se mostró también que la exposición de las tres caras y el aumento de la carga de servicio provocaron reducciones significativas del tiempo de resistencia al fuego. Los ensayos experimentales realizados permitieron además confirmar que los perfiles pultruidos de GFRP, cuando son expuestos a temperaturas elevadas, son más vulnerables a la compresión y el corte que a tracción. De hecho, en la mayor parte de los ensayos, el colapso de las vigas ocurre por compresión longitudinal de la cara superior y/o por compresión y corte de las almas. Las vigas sin protección pasiva expuestas al fuego a tres caras presentaron un mecanismo de colapso por corte con arqueado del alma.

El modelo numérico térmico (bidimensional), desarrollado en el *software* comercial ANSYS FLUENT, permitió evaluar la distribución de temperaturas en las vigas expuestas al fuego a una cara, no protegida y protegida con SC. En este modelo fueron consideradas los intercambios de calor entre el sólido (GFRP e SC) y el ambiente exterior (por radiación y convección), los intercambios de calor entre el sólido y el aire (fluido) en el interior de la cavidad por convección y también por radiación entre las paredes internas de la sección. Se obtuvo una razonable concordancia entre las curvas experimentales y las numéricas referentes a temperatura de las caras superior e inferior. Relativamente las almas, registraron diferencias significativas, que pueden ser explicadas por un deficiente aislamiento lateral entre el perfil de GFRP y las tapas del horno.

El modelo analítico desarrollado permitió estimar la evolución de los desplazamientos a medio vano de la viga no protegida expuesta al fuego en una cara. En este modelo, la sección transversal de la viga fue dividida en capas, las cuales fueron atribuidas a diferentes temperaturas en función del tiempo de exposición al fuego y, consecuentemente, diferentes propiedades mecánicas en tracción, compresión y el corte. Para cada instante de tiempo, las flechas a mitad del vano fueron calculadas a través de la teoría de vigas de Timoshenko. Se obtuvo buena concordancia entre la variación de los desplazamientos con el tiempo y estimativas relativamente precisas de los tiempos de resistencia al fuego.

6. AGRADECIMENTOS

Los autores quieren agradecer a FCT (proyecto PTDC/ECM/100779/2008) y al ICIST por el financiamiento de la investigación. El primer autor agradece a FCT por la beca doctoral SFRH/BD/94907/2013.

7. REFERENCIAS

- 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*, nº 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.