Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería
12-14 septiembre 2022, Las Palmas de Gran Canaria, España
© SEMNI, 2022

MODELO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE COLUMNAS TUBULARES DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN CON PERFILES EMBEBIDOS EN SITUACIÓN DE INCENDIO

David Medall[a,*], Ana Espinós[a], Vicente Albero[b], Carmen Ibáñez[a] , Manuel L. Romero[a]

[a]ICITECH, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022, Valencia, Spain
e-mail: damemar@doctor.upv.es, aespinos@mes.upv.es, caribus@upv.es, mromero@mes.upv.es

[b]Department of Mechanical Engineering and Construction, Universitat Jaume I, Castellón, Spain
e-mail: valbero@uji.es

Palabras clave: Resistencia frente al fuego, modelo de elementos finitos, integración seccional, análisis térmico.

Resumen *Cada vez es más común el uso de columnas mixtas de acero-hormigón en edificación, debido a las importantes reducciones de sección que permiten. En los últimos años, se han realizado numerosas investigaciones en la tipología CFST ("Concrete Filled Steel Tubular column"). Pese a ello, esta tipología se ve comprometida debido a su limitada resistencia al incendio en casos de elevada esbeltez. Con el fin de mejorar dicho comportamiento surge la tipología de columnas SR-CFST ("Steel Reinforced Concrete Filled Steel Tubular column"), que consiste en embeber dentro de la sección un perfil de acero estructural.*

En este artículo se presenta el desarrollo de un modelo de elementos finitos bidimensional que se ha utilizado para analizar el comportamiento térmico de las columnas SR-CFST en situación de incendio. Dicho modelo ha sido validado por comparación con los resultados experimentales que se encuentran disponibles en la bibliografía como los de Zhu et al. y los de Dotreppe et al., entre otros. Se hace uso del modelo numérico para llevar a cabo estudios paramétricos con el fin de discernir qué influencia tienen diferentes parámetros sobre la resistencia a compresión de la sección a temperatura elevada. Algunos de estos parámetros son la forma de la sección (cuadrada o circular), las dimensiones del perfil interior, el espesor de la pared del tubo de acero o la humedad del hormigón.

Teniendo en cuenta los resultados que se obtienen del estudio paramétrico, queda como trabajo futuro el desarrollo de una propuesta de distribución de temperaturas simplificada para cada una de las partes que conforman la sección, de cara a facilitar el cálculo de este tipo de secciones mixtas a temperatura elevada.

1. INTRODUCCIÓN

En trabajos previos del grupo de investigación se observa que las columnas de la tipología CFST ("Concrete Filled Steel Tubular column") fallan de forma prematura al exponerse al fuego. En los últimos años han surgido varias soluciones innovadoras para mejorar la resistencia al fuego de estas columnas [1]. Una de ellas consiste en embeber un perfil de acero dentro de la sección CFST, lo que permite proteger el perfil interior térmicamente gracias al efecto del hormigón que lo envuelve, resultando en una mejor resistencia a carga bajo la acción de incendio. Este tipo de columnas son las llamadas SR-CFST ("Steel Reinforced Concrete Filled Steel Tubular column").

En la bibliografía revisada existen un número limitado de experimentos realizados con columnas de la tipología SR-CFST expuestas al fuego. Entre ellos, destacan los trabajos trabajo de Zhu et al. [2] y Chu et al. [4], quienes ensayaron varias columnas con perfiles embebidos a temperatura elevada, entre otras tipologías. Por otro lado, Dotreppe et al. [3] llevaron a cabo varias investigaciones experimentales con columnas SR-CFST tanto expuestas directamente al fuego como protegidas con pintura intumescente.

Debido a la escasez de las investigaciones experimentales, muchos otros autores y grupos de investigación han estudiado el comportamiento de las columnas SR-CFST sometidas a alta temperatura mediante modelos numéricos. Estos modelos fueron validados con campañas experimentales disponibles en la bibliografía, con el fin de verificar el correcto funcionamiento del modelo. Algunos de ellos estudiaron la influencia de diversos parámetros de las columnas como el material utilizado en el tubo exterior [5], [6], la cantidad de acero situado dentro de la sección [7] o el material del perfil interior embebido [8].

Tras revisar la bibliografía, se observa que no existe un método especifico en los códigos de diseño internacional para calcular el comportamiento de estas secciones bajo la acción del fuego. Es por ello por lo que este artículo desarrollará un modelo numérico del que obtener la evolución del comportamiento resistente de las secciones SR-CFST a alta temperatura y los parámetros que influyen sobre ésta.

2. DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos bidimensional (2D) por medio del software de análisis de elementos finitos ABAQUS [9]. Debido a que la presente investigación está centrada en el comportamiento térmico de las secciones SR-CFST, un modelo bidimensional es suficiente para simular la distribución de temperatura dentro de la sección, dado que las columnas están expuestas uniformemente en toda su longitud. Los siguientes apartados exponen las principales características del modelo numérico desarrollado.

2.1. Geometría y malla del modelo

La geometría del modelo está compuesta por tres partes principales: el tubo de acero exterior, el relleno de hormigón y el perfil de acero embebido en el interior. Todas las partes se mallan utilizando elementos finitos triangulares de 3 nodos no lineales (DC2D3) con grado de libertad nodal de temperatura.
Según los resultados obtenidos en un estudio de sensibilidad de la malla, se establece un tamaño máximo de elemento de 10 mm. La Figura 1 muestra el mallado de dos secciones, cuadrada y circular utilizadas en el estudio.

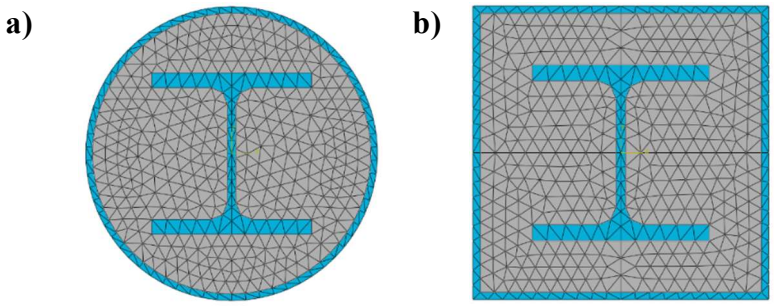


Figura 1. Ejemplo del mallado de elementos finitos de las secciones SR-CFST estudiadas en el presente artículo: a) circular b) cuadrada

Estudio de sensibilidad de la malla
Se realizó un estudio de sensibilidad del mallado de los modelos con el fin de obtener el tamaño óptimo de los elementos finitos en el modelo térmico tanto en términos de coste computacional como de precisión.
Para tal fin, se simularon los casos 3A y 4A de los experimentos de Dotrepppe et al. [3], seleccionando tres densidades de malla: 20 mm, 10 mm y 5 mm. La Figura 2 muestra que un tamaño grande de malla (20 mm) produce desviaciones considerables respecto a las temperaturas medidas experimentalmente. Por su lado, los tamaños de malla de 10 y 5 mm tenían más precisión, comportándose de forma más parecida a los experimentos utilizados para comparar. Debido a que ambos tamaños tenían una precisión muy similar, se escoge el tamaño de malla de 10 mm, debido a la considerable reducción de coste computacional que significaba respecto a el tamaño más pequeño (5 mm).

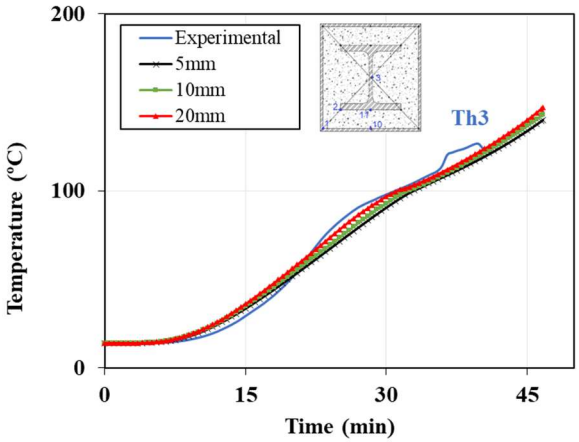


Figura 2. Estudio de sensibilidad de la malla. Comparación con el espécimen 4A ensayado por Chu [4].

2.2. Condiciones de contorno en la superficie expuesta

Mediante el software ABAQUS se llevó a cabo un análisis no lineal de transferencia de calor para obtener el campo de temperatura de las secciones a estudiar. Se aplicó una curva de calentamiento sobre la superficie expuesta según la curva de fuego estándar ISO-834. En los casos experimentales cuyas curvas de calentamiento diferían de dicho estándar, se les aplicó la curva de temperatura-tiempo medida en el horno dónde se ensayaron.
La acción de fuego se aplicó a la superficie expuesta como una carga térmica a través de los mecanismos de convección y radiación, tal y como especifica la sección 3 del EN 1991-1-2 [10]:

$$\nabla(\boldsymbol{k} \cdot \nabla\theta) = \rho c_p \frac{\partial\theta}{\partial t} \tag{1}$$

$$-\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{k} \cdot \nabla\theta = \alpha_c(\theta_m - \theta_g) + F \cdot \varepsilon \cdot \sigma(\theta_r^4 - \theta_g^4) \tag{2}$$

donde θ_m es la temperatura de la superficie expuesta, θ_g la temperatura del gas en las inmediaciones del elemento expuesto y θ_r la temperatura efectiva de radiación del fuego.

En cuanto a los parámetros necesarios para resolver el problema de transmisión de calor, se tomaron los valores recomendados por el EN 1991-1-2 [10]. Se estableció un coeficiente de convección de α_c = 25 W/m^{2}K en la superficie de acero. Para la componente de radiación, se fija una emisividad de ε = 0.7 en la superficie expuesta de acero y un valor para la emisividad del fuego ε = 1, siendo la constante de Stephan Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m^{2}K^4.
Los resultados obtenidos del análisis térmico consisten en la evolución temporal de las temperaturas nodales (NT11) en todos los nodos de la malla de elementos finitos.

2.3. Contacto térmico en la interfaz acero-hormigón

Al estar sometidas a temperatura elevada, en este tipo de secciones surge una separación transversal entre el tubo exterior de acero y el hormigón interior. Esto genera la aparición de un "hueco de aire" en la interfaz entre las dos superficies.

Dicha resistencia a la trasmisión de calor se conoce como la resistencia térmica al contacto y se suele expresar como una conductancia de la unión (h_j):

$$q = h_j \cdot \Delta\theta \tag{3}$$

El efecto de este "hueco de aire" fue estudiado por Ghojel et al. [11] en secciones de tipología CFST, estableciendo que dicho efecto crea una resistencia térmica adicional entre las superficies de acero y hormigón. Ghojel propuso una expresión para aproximar la conductancia térmica de la interfaz para columnas CFST circulares y cuadradas en función de la temperatura:

$$h_j = 160.5 - 63.8 \cdot \exp(-339.9 \cdot \theta_s^{-1.4})\, W/m^2 \cdot K \tag{4}$$

donde θ_s es la temperatura de la superficie de acero en grados Celsius.

Por otro lado, Tao y Ghannam [12] propusieron una ecuación diferente para evaluar el contacto térmico, en función de las dimensiones de la sección:

Circular: $$h_j = 160.5\text{-}63.8 \cdot \exp(\text{-}339.9 \cdot \theta_s^{\text{-}1.4})\, W/m^2 \cdot K \tag{5}$$

Cuadrada/rectangular: $$h_j = 160.5\text{-}63.8 \cdot \exp(\text{-}339.9 \cdot \theta_s^{\text{-}1.4})\, W/m^2 \cdot K \tag{6}$$

donde *D* es el diámetro del tubo circular y *B* es el lado de un tubo cuadrado o rectangular, en mm.

La presente investigación realiza un estudio de la influencia de la forma de modelar dicho "hueco de aire" en ABAQUS. Adicionalmente de los dos modelos comentados, se estudió también una conductancia constante de 200 W/m^{2}K, utilizada por los autores en investigaciones previas [13]. La Figura 3 muestra las temperaturas predichas por el modelo numérico con los tres enfoques comparadas a las temperaturas medidas experimentalmente. El modelo constante ofrece una buena precisión en la predicción además de tratarse del que menos tiempo de computación requiere. Por ello, se asume en el estudio paramétrico un valor constante de conductancia en el "hueco de aire" de 200 W/m^{2}K.

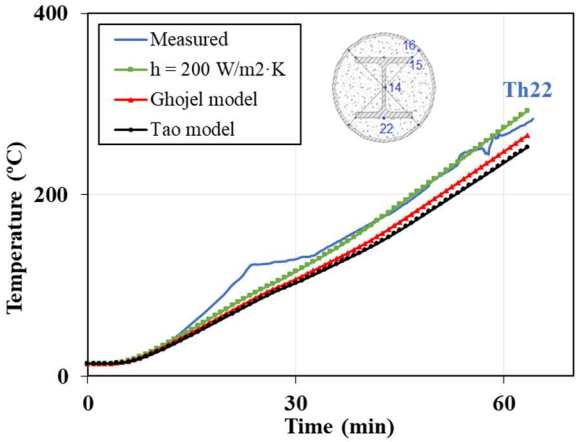


Figura 3. Estudio de sensibilidad de los modelos de "hueco de aire". Comparación con el espécimen 3A ensayado por Chu [4].

2.4. Propiedades de los materiales a alta temperatura

Las propiedades del térmicas del acero a alta temperatura -el calor específico (c_p) y la conductividad térmica (k)- se tomaron del EN 1993-1-2 [14].
Para el hormigón, las propiedades térmicas se obtuvieron del EN1992-1-2 [15], si bien para modelar la conductividad térmica (k) de este se adoptaron las recomendaciones del borrador del prEN 1992 1-2:2021 [16]. Este documento recomienda utilizar una transición entre el límite superior e inferior en el rango de temperaturas comprendido entre 140 ºC y 160 ºC.

Con el fin de tener en cuenta la evaporación del agua, se introdujo un valor extremo en el calor específico (c_p) del hormigón entre los 100 ºC y los 200 ºC, tal y como se indica en el EN 1994-1-2 [17]. En los casos en los que no proporcionaban datos de la humedad del hormigón, se supuso un contenido de humedad igual al 4% del peso del hormigón, como recomienda en el EN 1994-1-2 [17].

3. VALIDACIÓN DEL MODELO TÉRMICO

La presente sección describe el proceso de validación del modelo numérico, comparando la evolución de la temperatura predicha por el modelo numérico en ciertos puntos representativos de la sección, frente a las extraídas de los resultados experimentales de diversas campañas.

3.1. Validación de respuesta térmica de secciones SR-CFST

Se simularon mediante el modelo numérico los casos de la campaña experimental de Zhu et al. [2]. Estos casos de la validación incluyen cuatro tubos con sección cuadrada expuestos a 1, 2, 3 y 4 caras (S1H, S2H, S3H y S4H, respectivamente) y dos tubos circulares con media exposición y exposición total (C2H y C4H, respectivamente). Se simuló la protección térmica de las caras expuestas añadiendo una capa de fibra cerámica con una conductividad térmica de 0.1-0.2 W/mºC en las caras protegidas. Se utilizó una humedad del 5% según indica el artículo

[2].

Adicionalmente, se utilizaron los datos experimentales de las columnas 3A y 4A de Chu et al. [4].; circular y cuadrada, respectivamente. Son columnas de dimensiones reducidas con un perfil HEB 120 embebido en su interior. Se consideró una humedad del 6% según especifican Dotreppe et al. [3]. Los experimentos 3B y 4B de la misma campaña, pese a estar protegidos con pintura intumescente, fueron añadidos a la validación.

3.2. Validación de respuesta térmica de secciones CES

Debido al escaso número de campañas experimentales sobre el comportamiento térmico de secciones SR-CFST existentes en la bibliografía, se complementó la validación del modelo numérico haciendo uso de los datos experimentales de columnas de tipología CES ("Concrete Encased Sections") a alta temperatura. Esta tipología consiste en una sección de hormigón armado con un perfil embebido en su interior. Debido a las similitudes entre ambos tipos de secciones, pueden ser incluidas para extender la validación del modelo.

Esta validación consistió en diferentes secciones de las campañas experimentales de Huang et al.[18],[19], Mao y Kodur [20], Han et al. [21] y Du et al. [22].
Se utilizaron las columnas RCC03, SZCC03 y SZCC04 de la campaña experimental de Huang et al.[19] Se consideró una humedad del 4% en el hormigón, debido a la ausencia de este dato en el artículo. Se seleccionaron cuatro casos ensayados por Mao y Kodur [20]: tres secciones rectangulares (FR4S38, FR3S37 y FR3S65) y una cuadrada (FR4S06). Se introdujo un porcentaje de humedad del 5.79%, según establece el artículo. Se incluyó además en la validación el caso de sección cuadrada SRC1-1 de Han et al. [21]. Ya que no se especificaba su valor, se asumió una humedad en el hormigón del 4%. Finalmente se utilizó el caso SRHSC-1 de Du et al. [22], fabricado con hormigón de alta resistencia. La humedad medida fue del inferior al 3% en este caso.

3.3. Resumen de la validación

La Figura 4 presenta un resumen de la validación del modelo numérico, en la que se muestran las temperaturas medidas experimentalmente y predichas por el modelo en diferentes tiempos de exposición al fuego (R30, 60, 90, 120, etc.). El modelo proporciona una buena precisión, estando la mayoría de los puntos en el rango de ± 15%.
La media y desviación típica del error en la predicción de las temperaturas obtenidas con el modelo numérico se puede observar en la tabla 1, donde los errores se han calculado como T_{num}/T_{pred}. Observando dicha tabla, es posible ver que el modelo es más preciso para temperaturas superiores a 300ºC. Esto es debido a la evaporación del agua del hormigón, que tiene lugar entre 100ºC y 200ºC y crea un valle en las temperaturas difícil de replicar en el modelo numérico. Aun así, pasado este fenómeno el modelo es capaz de predecir con considerable precisión el comportamiento térmico de las secciones.
Teniendo en cuenta dichos resultados y el número de secciones, se considera que el modelo es fiable para llevar a cabo estudios paramétricos del comportamiento de las secciones SR-CFST.

Tipo de sección	T<300ºC		T ≥ 300ºC		Todo el rango de T	
	Media	Des. Est.	Media	Des. Est.	Media	Des. Est.
Todas	1.06	0.24	0.99	0.08	1.03	0.2
SR-CFST	1.06	0.3	1.04	0.17	1.06	0.26
CES	1.03	0.26	1.01	0.08	1.02	0.21

Tabla 1. Resumen de los errores en la validación del modelo térmico (T_{num}/T_{pred}).

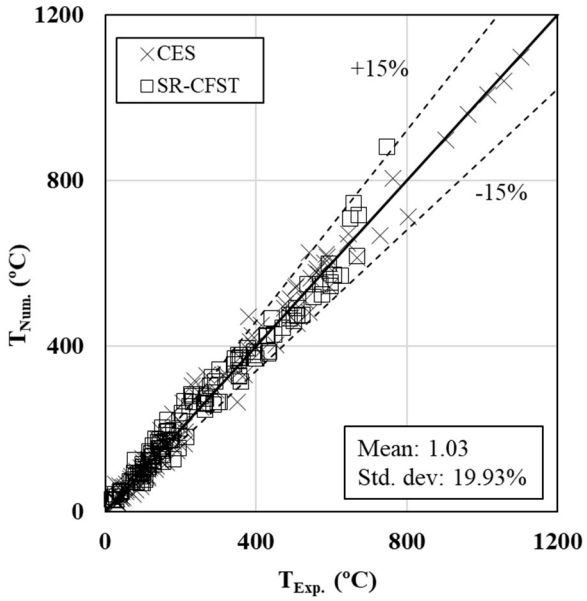


Figura 4. Comparación de las temperaturas estimadas mediante el modelo numérico frente a las temperaturas medidas experimentalmente en los distintos casos utilizados en la validación.

4. ESTUDIO PARAMÉTRICO DE LA RESPUESTA TERMO-MECÁNICA DE SECCIONES SR-CFST

4.1. Selección de las secciones del estudio paramétrico

Se presenta a continuación un análisis paramétrico llevado a cabo mediante el modelo numérico para analizar la influencia de diferentes factores sobre el comportamiento de las secciones de tipología SR-CFST bajo la acción del fuego.

Los parámetros modificados para generar el conjunto de casos fueron la dimensión exterior del tubo de acero (*D* o *B* para columnas circulares o cuadradas, respectivamente), el grosor del tubo exterior (*t*) y las dimensiones del perfil interior. De esta forma se obtuvieron 8 grupos de columnas circulares y 8 cuadradas que, para poder compararlas entre sí, verificando que contuvieran la misma cantidad de acero, con diferencias menores al 2%.

Todos los tubos de acero analizados se seleccionaron para cumplir el criterio de secciones no esbeltas según el EN 1993-1-1 [23], excepto el caso CHS 508x8 que clasifica como clase 4. Se utilizaron para los perfiles interiores secciones HEA y HEB del catálogo europeo y sus dimensiones fueron progresivamente aumentadas. En algunos casos, se estudiaron varios perfiles dentro de una misma sección, aunque en los tubos más pequeños solo fue posible embeber un tipo de perfil. Para la humedad del hormigón tres valores fueron estudiados: el 4%, el 7% y el 10%, con el fin de estudiar la influencia de este parámetro en el comportamiento térmico de la sección.
Con ello, se obtuvieron **360 casos** a analizar (180 circulares y 180 cuadrados), véase tabla 2. Para el acero se utilizó un límite elástico de 355 MPa mientras que para la resistencia a compresión del hormigón se usó un valor de 30 MPa (asumiendo áridos calizos). Para las propiedades a alta temperatura tanto del hormigón como del acero se utilizaron las recomendadas en el EN 1994-1-2 [17] excepto para la conductividad térmica del hormigón, para la que se utilizó la nueva propuesta del prEN 1992-1-2:2021 [16]. Para el "hueco de aire" generado entre la pared interior del tubo y el hormigón, considerando un valor constante de conductividad de 200 W/m^{2}K, basándose en el estudio de sensibilidad previo.

D (mm)	t (mm)	Perfil interior	B (mm)	t (mm)	Perfil interior
193.7	4 / 8	HE100B	150	4 / 8	HE100B
219.1	4 / 8	HE120B	175	4 / 8	HE120B
273	5 / 10	HE140B	220	5 / 10	HE140B
323.9	6 / 10	HE140B – HE180B	260	6 / 10	HE140B – HE180B
355.6	6 / 12.5	HE100B – HE200B	300	6 / 12.5	HE100B – HE200B
406.4	7 / 14.2	HE120B – HE220B	325	7 / 14.2	HE120B – HE220B
457	8 / 10	HE100 – HE180B – HE280B	350	8 / 10	HE100 – HE180B – HE280B
508	8 / 10	HE100 – HE200B – HE300B	400	8 / 10	HE100 – HE200B – HE300B

Tabla 2. Resumen de los casos analizados en el estudio paramétrico.

4.2. Integración seccional para el cálculo de la resistencia plástica y rigidez a flexión

En primer lugar, se extraen del análisis térmico las temperaturas nodales en los diferentes tiempos de exposición al fuego (R30, 60, 90, 120, etc.) . Cada uno de los elementos triangulares de la malla está caracterizado mediante su posición (z_i, y_i), área (A_i) y temperatura (θ_i). (ver Figura 5). De esta forma, utilizando las propiedades de los materiales asignadas a cada elemento (acero y hormigón), es posible integrar los valores de la resistencia plástica y la rigidez a flexión en los ejes fuerte y débil de la sección utilizando las ecuaciones que incluidas a continuación:

$$N_{fi,pl,Rd} = \sum_{i=1}^{n} A_{a,i} \cdot k_{y_a,\theta_i} \cdot f_{y_a} + \sum_{i=1}^{n} A_{c,i} \cdot k_{c,\theta_i} \cdot f_c + \sum_{i=1}^{n} A_{p,i} \cdot k_{y_p,\theta_i} \cdot f_{y_p} \quad (7)$$

$$EI_{z,fi} = \sum_{i=1}^{n} A_{a,i} \cdot y_i^2 \cdot k_{E_a,\theta_i} \cdot E_a + \sum_{i=1}^{n} A_{c,i} \cdot y_i^2 \cdot E_{c,sec,\theta_i} + \sum_{i=1}^{n} A_{p,i} \cdot y_i^2 \cdot k_{E_p,\theta_i} \cdot E_p \quad (8)$$

$$EI_{y,fi} = \sum_{i=1}^{n} A_{a,i} \cdot z_i^2 \cdot k_{E_a,\theta_i} \cdot E_a + \sum_{i=1}^{n} A_{c,i} \cdot z_i^2 \cdot E_{c,sec,\theta_i} + \sum_{i=1}^{n} A_{p,i} \cdot z_i^2 \cdot k_{E_p,\theta_i} \cdot E_p \quad (9)$$

donde los subíndices *a*, *c* y *p* corresponden con el tubo de acero, el relleno de hormigón y el perfil de acero interior, respectivamente.

Los coeficientes de reducción de las propiedades mecánicas debidos a la temperatura ($k_{y,\theta}$, $k_{c,\theta}$, $k_{E,\theta}$) se obtienen del EN1994-1-2 [17]. El factor de reducción del módulo secante del hormigón ($Ec,sec_{,\theta i}$) puede deducirse mediante la siguiente expresión:

$$E_{c,sec,\theta_i} = \frac{f_{c,\theta_i}}{\varepsilon_{cu,\theta_i}} = \frac{k_{c,\theta_i}}{\varepsilon_{cu,\theta_i}} \cdot f_c \quad (10)$$

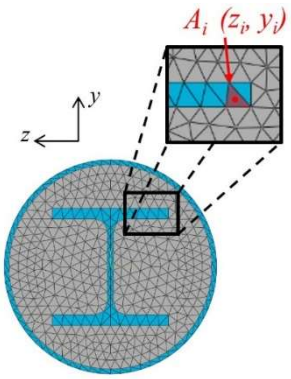


Figura 5. Detalle de la posición (z_i, y_i), centroide y área (A_i) de un elemento triangular de la malla.

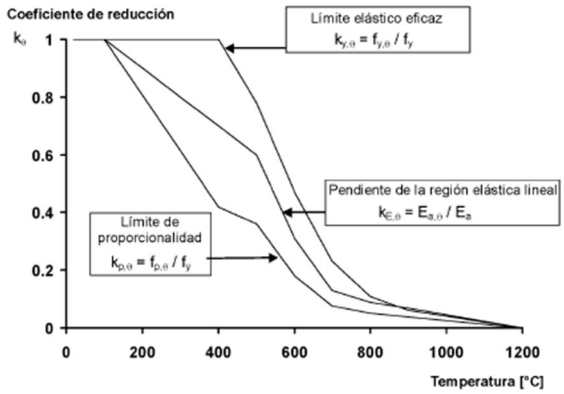
Con el objeto de aplicar el procedimiento descrito a todas las secciones del estudio paramétrico, se diseñó una subrutina de Python [24]. Este procedimiento consistió en recorrer los diferentes elementos de cada una de las partes de la sección compuesta y adquirir los valores de temperatura medios de cada celda de la malla. El proceso se realizó de forma iterativa, recorriendo la matriz de conectividad de la malla por elementos, guardando las temperaturas de cada uno de los nodos de cada celda y calculando la media de dichos valores para obtener la temperatura promedio de esta (ver Figura 6).

```
# Se extrae el campo de temperaturas completo
tempfield=frame.fieldOutputs['NT11'].values

# Recorremos la matriz de conectividad (por elementos)
for elem in odb.rootAssembly.instances['TUBE-1'].elements:
# TUBO
    sem=0
    for temp in tempfield:

        if temp.instance.name=='TUBE-1' and temp.nodeLabel == elem.connectivity[0]:
            temp0 = temp.data
            for node in odb.rootAssembly.instances['TUBE-1'].nodes:
                if node.label == elem.connectivity[0]:
                    x0 = node.coordinates[0]
                    y0 = node.coordinates[1]
                    break
            sem=sem+1
        elif temp.instance.name=='TUBE-1' and temp.nodeLabel == elem.connectivity[1]:
            temp1 = temp.data
            for node in odb.rootAssembly.instances['TUBE-1'].nodes:
                if node.label == elem.connectivity[1]:
                    x1 = node.coordinates[0]
                    y1 = node.coordinates[1]
                    break
            sem=sem+1
        elif temp.instance.name=='TUBE-1' and temp.nodeLabel == elem.connectivity[2]:
            temp2 = temp.data
            for node in odb.rootAssembly.instances['TUBE-1'].nodes:
                if node.label == elem.connectivity[2]:
                    x2 = node.coordinates[0]
                    y2 = node.coordinates[1]
                    break
            sem=sem+1
        if sem==3:
            break
    # Temperatura del elemento
    tempElem=(temp0+temp1+temp2)/3
```

Figura 6. Código de la subrutina de Python utilizado para realizar la integración seccional y obtener la temperatura media de cada celda.

Una vez obtenido este valor, es posible calcular las propiedades de los materiales a dicha temperatura mediante funciones simples, implementando las tablas 3.2 y 3.3 del EN1994-1-2 [17] en el código. El área, centroide e inercia de cada celda se obtienen gracias a que se han guardado las posiciones de los nodos de esta (x_o, y_o, x_{o1}, y_1, x_2, y_2). Finalmente, se realizan los sumatorios para obtener la resistencia plástica y rigidez a flexión de cada parte de la sección. La Figura 7 siguiente muestra la función para el cálculo del límite elástico del acero junto a la tabla del EN1994-1-2 [17] de la que se han obtenido los valores incluidos en el código:

a) **b)**




```
# Area del elemento (mm2)
areaElem = 0.5*(x0*y1+x1*y2+x2*y0-x2*y1-y2*x0-x1*y0)*1000000

# Posición del centroide en X e Y
ycentroide=((y0+y1+y2)/3)
xcentroide=((x0+x1+x2)/3)

# Inercia del elemento en X e Y
I_y=areaElem*(xcentroide**2)
I_x=areaElem*(ycentroide**2)

#Calculo de los sumatorios
sumFTube = sumFTube + areaElem * redSteelTemp(tempElem,fsteel
sumEI_xTube = sumEI_xTube + I_x*redSteelTempE(tempElem,Esteel
sumEI_yTube = sumEI_yTube + I_y*redSteelTempE(tempElem,Esteel
```

Figura 7.Coeficiente de reducción para la relación tensión -deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas incluido en el EN1993-1-2 [14] (a) y código de la subrutina de Python utilizado para calcular el sumatorio para obtener las propiedades mecánicas. (b).

4.3. Análisis de los resultados del estudio paramétrico

La presente sección analiza los resultados obtenidos del estudio paramétrico. En los siguientes apartados se estudia el efecto de la forma de la sección exterior (circular o cuadrada), el grosor del tubo exterior de acero (expresado a través de la esbeltez seccional, *D/t* o *B/t*), el factor de sección (A_m/V), las dimensiones del perfil interior (a través del ISCR) y la humedad del hormigón.

Influencia de la forma de la sección

En la Figura 8 muestra la resistencia plástica para las diferentes columnas analizadas ordenadas según su área total de acero (tubo exterior + perfil interior). Al aumentar la cantidad de acero, aumenta la capacidad mecánica de la columna de forma lineal. Además, la diferencia que aparece entre perfiles circulares y cuadrados con el mismo contenido de acero muestra cómo las circulares tienen una mejor resistencia plástica que las circulares. Esto es debido a dos factores: primero al menor factor de sección (A_m/V) de las columnas circulares, lo que mejora su comportamiento bajo la acción de incendio y, segundo, debido a la menor distancia entre la parte interior del tubo de acero y el perfil de acero interior de las secciones cuadradas, lo que aumenta la rapidez en la que el calor se trasmite al perfil, deteriorando más rápidamente sus propiedades mecánicas.

Esta diferencia entre las dos geometrías incrementa a medida que aumenta el tiempo de exposición, como se puede ver comparando las secciones expuestas a un tiempo de resistencia al fuego R30 con las que se encuentran a R120 (ver Figura 8).

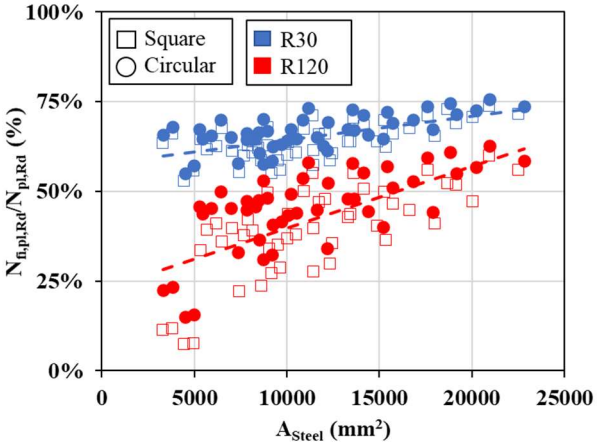


Figura 8.Influencia del área total de acero sobre la resistencia plástica seccional para columnas circulares y cuadradas.

Influencia del grosor del tubo exterior

La relación entre la esbeltez seccional (*D/t*) y la resistencia plástica es linealmente positiva, véase la Figura 9. Al aumentar el parámetro *D/t*, el área de acero del tubo exterior se ve reducida, permitiendo situar más cantidad de hormigón dentro de la sección y mayores dimensiones para el perfil de acero embebido. Además, al estar expuesto directamente al fuego, el tubo exterior ve reducidas sus propiedades mecánicas rápidamente. Por ello, reducir el acero de este elemento y permitir más área tanto de hormigón como de perfil interior conduce a un mejor comportamiento térmico y, por tanto, un incremento en la capacidad portante de la sección a temperatura elevada.

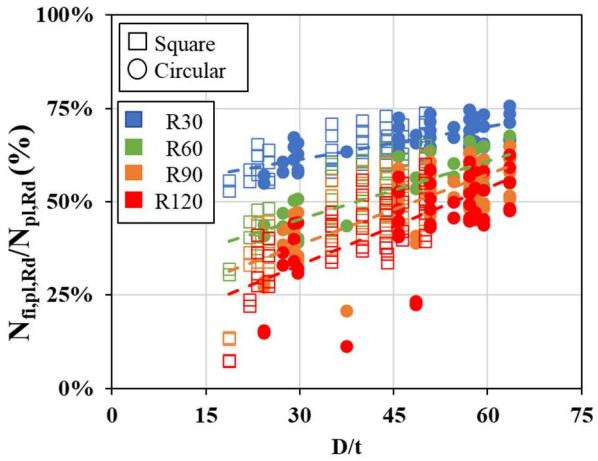


Figura 9. Influencia de la esbeltez seccional (*D/t*) sobre la resistencia plástica de las secciones para columnas circulares y cuadradas.

Influencia del factor de sección

El factor de sección (A_m/V) es un parámetro que mide la cantidad de acero expuesto al fuego en relación con el volumen calentado, lo que permite analizar la influencia de la geometría externa de la sección y sus dimensiones en la respuesta térmica de la sección. Antes de analizar su efecto cabe destacar que este parámetro se calcula como *4/D* para columnas circulares de tipología SR-CFST y *4/B* para columnas cuadradas de tipología SR-CFST.

La Figura 10 muestra cómo, al aumentar el factor de sección disminuye la resistencia plástica de las secciones, con una tendencia lineal negativa. Al aumentar el A_m/V también se incrementa el perímetro expuesto al fuego, lo que lleva a un calentamiento de la sección más acelerado y, por tanto, a una pérdida de capacidades mecánicas más elevada. Cabe destacar que el factor de sección (A_m/V) en las columnas cuadradas es más elevado que en sus equivalentes circulares, lo que explica que su temperatura suba más rápido y se deteriore antes.

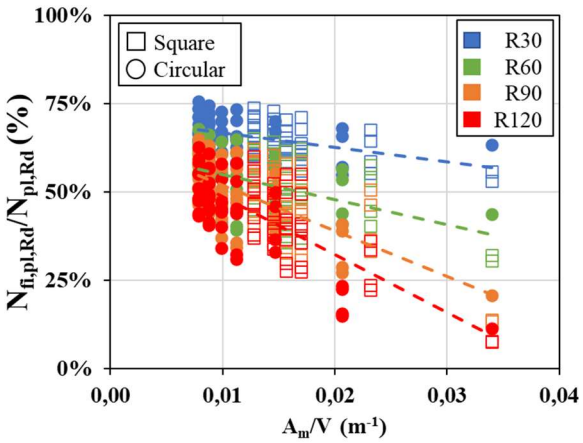


Figura 10.Influencia del factor de sección (A_m/V) sobre la resistencia plástica seccional para columnas circulares y cuadradas.

Influencia de las dimensiones del perfil interior

Para evaluar el efecto del perfil interior en la sección, los autores han definido el parámetro ISCR ("Inner Contribution Steel Ratio") que puede calcularse como A_p/A_c (área de acero del perfil dividido por el área de hormigón de la sección).

En la Figura 11 se muestran los diferentes perfiles embebidos en las secciones CHS 508 mm x 8 mm y SHS 400 mm x 8 mm: HEA100, HEB100, HEA200, HEB200, HEA300 y HEB300. Se compara la resistencia seccional de cada columna con el caso de referencia que tiene el perfil HEA100 embebido. Se observa que, a medida que aumenta el ISCR, también se incrementa la resistencia plástica de las secciones mixtas. Además, comparando los perfiles de tipología HEA con los HEB se observa una mayor capacidad mecánica en los segundos, principalmente debida a la mayor área de estos.

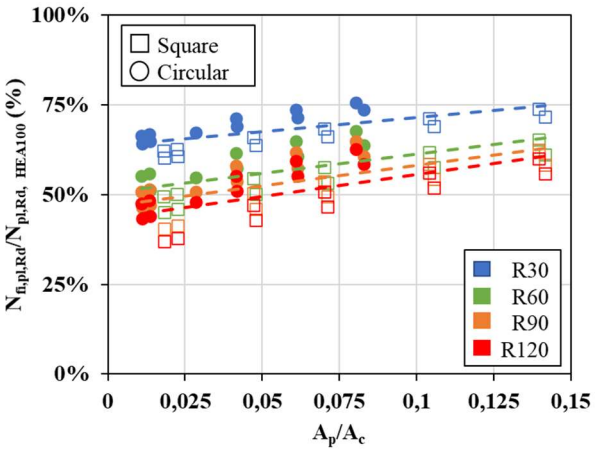


Figura 11. Influencia del ISCR sobre la resistencia plástica de las secciones para columnas circulares y cuadradas.

Influencia de la humedad del hormigón

Se estudió adicionalmente mediante el modelo numérico del efecto que tiene el contenido de humedad en el hormigón sobre la resistencia plástica seccional, considerando tres valores de humedad: 4%, 7% y 10%. En la Figura 12 se observa este efecto para el caso CHS de diámetro exterior 194 mm y un perfil embebido HEA100. Un mayor contenido de humedad en el hormigón tiene un efecto positivo en el comportamiento de este tipo de columnas expuestas al fuego. La presencia de agua en la masa de hormigón ralentiza el calentamiento de la sección, pues parte del calor aportado se invierte en evaporar el agua (calor latente), y por tanto el deterioro de la resistencia seccional es más lento. Cabe destacar que la diferencia es más notable entre las humedades del 4% y el 7%, mostrando una mejoría considerable y menos pronunciada a humedades más elevadas.

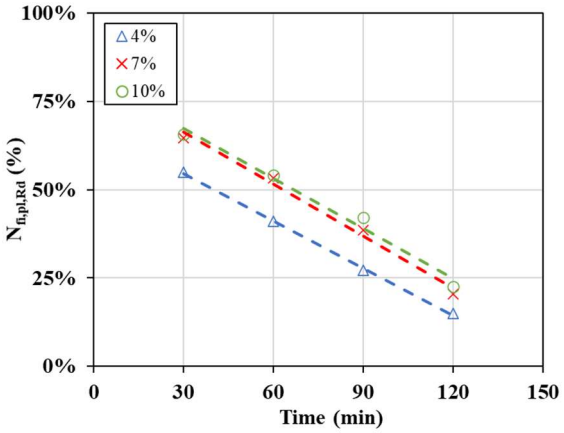


Figura 12. Influencia de la humedad del hormigón sobre la resistencia plástica de las secciones para columnas circulares y cuadradas.

6. CONCLUSIONES

En la presente investigación se ha desarrollado un modelo numérico seccional mediante el software de análisis no lineal por elementos finitos ABAQUS. Este modelo ha sido validado con diferentes campañas experimentales encontradas en la bibliografía y posteriormente ha sido utilizado para realizar un estudio paramétrico.

Se han incluido en el estudio paramétrico un total de 360 casos de secciones SR-CFST sometidos a la curva de calentamiento ISO-834. Una vez realizado el análisis térmico, se ha automatizado una subrutina de cálculo en Python elaborada por los autores para obtener la resistencia plástica y la rigidez a flexión de todos los elementos que componen la sección, obteniendo por integración seccional la capacidad de cada una de las columnas analizadas a distintos tiempos de exposición al fuego. Mediante estos valores se ha analizado la influencia de diferentes parámetros de diseño en la resistencia mecánica de las secciones. Los parámetros estudiados son la geometría de la sección (circular o cuadrada), el espesor del tubo de acero exterior, el factor de sección (A_m/V), el ISCR ("Inner Steel Contribution Ratio") y el contenido de humedad del hormigón. A igualdad de área de acero, se ha comprobado que las columnas circulares presentan un mejor comportamiento que las cuadradas debido a su menor factor de sección. Se ha observado además que, tanto la reducción del espesor del tubo exterior como el aumento de las dimensiones del perfil interior, aumentan las capacidades mecánicas de las secciones a temperatura elevada.

A la vista de los resultados obtenidos, este análisis numérico abre la posibilidad de desarrollar ecuaciones de diseño simplificadas que permitan calcular la temperatura equivalente de cada una de las partes que forman una sección mixta de tipo SR-CFST bajo la situación de incendio normalizado. De este modo, sería posible cubrir una necesidad que no está incluida en la actual versión del EN 1994-1-2 [17] para el diseño de este tipo de secciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo proporcionado a través de la Ayuda PID2019-105908RB-I00 y por el contrato predoctoral del primer autor a través de la Ayuda PRE2020-093106 financiadas por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por "FSE Invierte en tu futuro".

REFERENCIAS

[1] A. Espinos, M. L. Romero, E. Serra, and A. Hospitaler, "Circular and square slender concretefilled tubular columns under large eccentricities and fire," Journal of Constructional Steel Research, vol. 110, (2015), doi: 10.1016/j.jcsr.2015.03.011.

[2] Zhu Meichun, Meng Fanqin, and He Baojie, "Experimental research on fire resistance of steel tubular columns filled with steel reinforced concrete," Journal of Building Structures, vol. 37, no. 3, pp. 36–43, (2016).

[3] J. Claude Dotreppe, T. Binh Chu, R. Eng, and J. Marc Franssen, Steel hollow columns filled with self-compacting concrete under fire conditions. Proceedings of the 3rd Congress of the International Federation for Structural Concrete (FIB) and PCI Conference, (2010).

[4] Chu TB, Gernay T, Dotreppe J-C, Franssen J. Steel hollow columns with an internal profile filled with self-compacting concrete under fire conditions, 2016.

[5] Tan Q, Gardner L, Han L. Performance of Steel-Reinforced Concrete-Filled Stainless Steel Tubular Columns at Elevated Temperature. International Journal of Structural Stability and Dynamics 2019;19. https://doi.org/10.1142/S0219455419400029.

[6] Tan Q-H, Gardner L, Han L-H, Song T-Y. Fire performance of steel reinforced concrete-filled stainless steel tubular (CFSST) columns with square cross-sections. Thin-Walled Structures 2019;143. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106197.

[7] Espinos A, Romero ML, Lam D. Fire performance of innovative steel-concrete composite columns using high strength steels. Thin-Walled Structures 2016;106:113–28. https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.04.014.

[8] Mao W-J, Wang W-D, Xian W. Numerical analysis on fire performance of steel-reinforced concrete-filled steel tubular columns with square cross-section. Structures 2020;28:1–16. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.043.

[9] Abaqus/CAE User's Guide. Version 2019 2019.

[10] CEN. EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire 2002.

[11] Ghojel J. Experimental and analytical technique for estimating interface thermal conductance in composite structural elements under simulated fire conditions. Experimental Thermal and Fluid Science 2004;28:347–54.

[12] Tao Z, Ghannam M. Heat transfer in concrete-filled carbon and stainless steel tubes exposed to fire. Fire Safety Journal 2013;61:1–11. https://doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2013.07.004.

[13] Espinos A, Romero ML, Hospitaler A. Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns. Journal of Constructional Steel Research 2010. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.03.002.

[14] CEN. EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2: General rules – Structural fire design 2005.

[15] CEN. EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1.2: General rules – Structural fire design 2004.

[16] CEN/TC250/SC2 N1897 - Stable version prEN 1992-1-2:2021-09. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. 2021.

[17] CEN. EN 1994-1-2, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1.2: General rules - Structural fire design 2005.
[18] Huang Z-F, Tan K-H, Toh W-S, Phng G-H. Fire resistance of composite columns with embedded I-section steel - Effects of section size and load level. Journal of Constructional Steel Research 2008;64:312–25. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.07.002.
[19] Huang Z-F, Tan K-H, Phng G-H. Axial restraint effects on the fire resistance of composite columns encasing I-section steel. Journal of Constructional Steel Research 2007;63:437–47. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.07.001.
[20] Mao X, Kodur VKR. Fire resistance of concrete encased steel columns under 3- and 4-side standard heating. Journal of Constructional Steel Research 2011;67:270–80. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.11.006.
[21] Lin-Hai H, Qing-Hua T, Tian-Yi S. Fire Performance of Steel Reinforced Concrete Columns. Journal of Structural Engineering 2015;141:04014128. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001081.
[22] Du Y, Qi H, Jiang J, Richard Liew JY, Li S. Thermo-mechanical behaviour of ultra-high strength concrete encased steel columns in standard fires. Engineering Structures 2021;231:111757. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111757.
[23] CEN. EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings 2005.
[24] Python 3.10.4 Documentation. Version 2022.