

Efecto del *spalling* sobre la resistencia a flexión biaxial de pilares de hormigón armado expuestos a fuego

Effect of Spalling on the Biaxial Bending Resistance of Reinforced Concrete Columns Exposed to Fire

David L. Peña Mansilla^a, Vicente Albero Gabarda^{*,b}, Carmen Ibáñez Usach^a, Antonio Hospitaler Pérez^a, Ana Espinós Capilla^a, Manuel L. Romero García^a

^a Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón. Universitat Politècnica de València.

^b Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universitat Jaume I, Castellón.

Recibido el 30 de mayo de 2019; aceptado el 14 de diciembre de 2020

RESUMEN

El hormigón expuesto al fuego puede sufrir *spalling* al aumentar la presión en los poros por evaporación del agua y esto conlleva el desconchamiento de su superficie. Este trabajo evalúa sus consecuencias sobre la resistencia a flexión biaxial de pilares de hormigón armado expuestos al fuego mediante un modelo secuencial de evaluación de la resistencia fuego. Se trata de un modelo seccional de fibras con integración por celdas. El modelo genera las superficies de interacción de los pilares a flexión biaxial y uniformemente expuestos por sus cuatro caras a la curva de fuego ISO 834.

©2022 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

PALABRAS CLAVE: Hormigón armado, material, *spalling*, pilares, flexión, biaxial, resistencia al fuego.

ABSTRACT

Concrete exposed to fire can experience *spalling* when the pore pressure increases due to water evaporation and that results in the surface sloughing off. This work evaluates the consequences that *spalling* has on the biaxial bending resistance of reinforced concrete columns exposed to fire by means of a sequential model. In this case, it is a sectional model with fibres integration. The model is able to generate the interaction surfaces of the columns subjected to biaxial bending and 4-sided uniformly exposed to the standard fire curve ISO 834.

©2022 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

KEYWORDS: Reinforced concrete, material, *spalling*, columns, bending, biaxial, fire resistance.

1. INTRODUCCIÓN

El *spalling* es un fenómeno que sufre el hormigón expuesto al fuego debido al aumento de presión en los poros por evaporación del agua y por el cual su capa superficial se desconcha.

Este desprendimiento, violento o no, de las capas o trozos de hormigón más superficiales de un elemento estructural se da cuando, además de estar expuesto a altas temperaturas, la velocidad de calentamiento es alta, con velocidades típicamente de 20-30°C/min [1]. Cuando aparece durante los primeros 30

* Persona de contacto / *Corresponding author*.
Correo-e / e-mail: valbero@uji.es (Vicente Albero Gabarda).

minutos de exposición al fuego puede llegar a ser de carácter explosivo [2, 3]. Sin embargo, la manera en que se manifiesta a partir de los 30 minutos cambia. Así pues, el *spalling* puede agruparse en 4 tipologías: (a) *spalling* de áridos; (b) *spalling* explosivo; (c) *spalling* superficial; (d) *spalling* de esquina [1]. Los tres primeros están altamente influenciados por la velocidad de calentamiento, mientras que el cuarto tipo, el de esquina, depende más fuertemente de las máximas temperaturas alcanzadas y no es de tipo violento, a diferencia del resto.

El *spalling* produce una pérdida relevante de la sección resistente de los elementos estructurales de hormigón armado (HA). Existe un debate abierto sobre la probabilidad de aparición del *spalling* y las causas que lo producen. Los parámetros que influyen en la aparición del mismo son: la humedad de la masa de hormigón, la velocidad de calentamiento, estado tensional previo, la permeabilidad, la resistencia a compresión del hormigón, el recubrimiento y separación de las armaduras o el método de vibrado del hormigón [2-4].

Casi todo lo que se conoce acerca del *spalling* en el hormigón viene de la experiencia y observación de edificios y otras estructuras expuestas a fuego [5].

El alcance, severidad y tipo de origen es variado. El *spalling* puede ser insignificante en cantidad y efectos como cuando se generan únicamente hendiduras superficiales. Sin embargo, también puede tener un serio efecto en la resistencia al fuego de un elemento estructural debido al desprendimiento de una parte significativa de hormigón que deje expuesto el núcleo de la sección o las armaduras, y, tras lo cual, se produzca un rápido aumento de la temperatura en estas partes, reduciendo así la respuesta de la estructura al fuego [5].

Este trabajo se centra en el estudio del *spalling* de esquina que ocurre en las esquinas convexas de un elemento estructura [6]. Se produce un desprendimiento de hormigón que deja expuestas las armaduras directamente a la acción del fuego [2].

El daño que el *spalling* causa a una estructura de hormigón armado puede hacer que los cálculos de diseño a fuego empleados ya no sean seguros y, por lo tanto, llevar a niveles bajo de seguridad al fuego [1]. Por ello, diferentes investigadores se han centrado en el desarrollo de modelos predictivos. Dwaikat y Kodur [7] implementaron un modelo unidimensional basado en el cálculo de la presión de poro. Lottman y colaboradores [8] presentaron un modelo basado en dos modelos de elemen-

tos finitos acoplados donde el primero determina la evolución de la temperatura y presión de poro y, el segundo, el mecanismo de fractura que da lugar al *spalling*.

Sin embargo, este artículo no se centra en la predicción del fenómeno si no en evaluar las consecuencias del mismo. En el campo de las estructuras de hormigón armado, y más concretamente pilares, el reciente trabajo de Buch y Sharma [9] pone de manifiesto que todavía es materia de estudio hoy en día el efecto en la resistencia al fuego de las estructuras de cargas excéntricas en combinación con *spalling*. Tras llevar a cabo una campaña experimental en pilares de hormigón armado sujetos a cargas excéntricas, observan que un aumento en la excentricidad de la carga favorece la ocurrencia de *spalling*. Al igual que Khoury [1] concluyen que la presencia (no tanto la cuantía) de armadura longitudinal limita el *spalling* y que en particular son efectivas las armaduras que se distribuyen a lo largo de las caras (aunque es difícil de usar en secciones pequeñas).

En este trabajo, se pretende evaluar los efectos del *spalling* sobre elementos de hormigón armado, concretamente el efecto en la resistencia a flexión biaxial de pilares expuestos al fuego. Para ello se desarrolla un modelo secuencial y seccional para la evaluación de la resistencia al fuego de secciones de hormigón armado. En las secciones siguientes se describirá brevemente el modelo y su validación y, a continuación, se aplicará a la evaluación del efecto del *spalling*.

2. DESCRIPCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

En la práctica, una de las situaciones de carga más comunes para los pilares de HA es compresión combinada con flexión biaxial debida a la transferencia de carga desde las vigas y losas adyacentes. Sin embargo, la mayoría de estudios se centran en el análisis de pilares frente a compresión y flexión uniaxial.

Son escasos los modelos que se pueden encontrar en la literatura para el diseño de columnas de HA en fuego sujetas a flexión biaxial. Destacan los trabajos presentados por Wang *et al.* [10] y Kodur y Raut [11], quienes estudiaron numéricamente la capacidad frente al fuego de este tipo de columnas ante exposiciones asimétricas. Además, el EN 1992-1-2 [12]

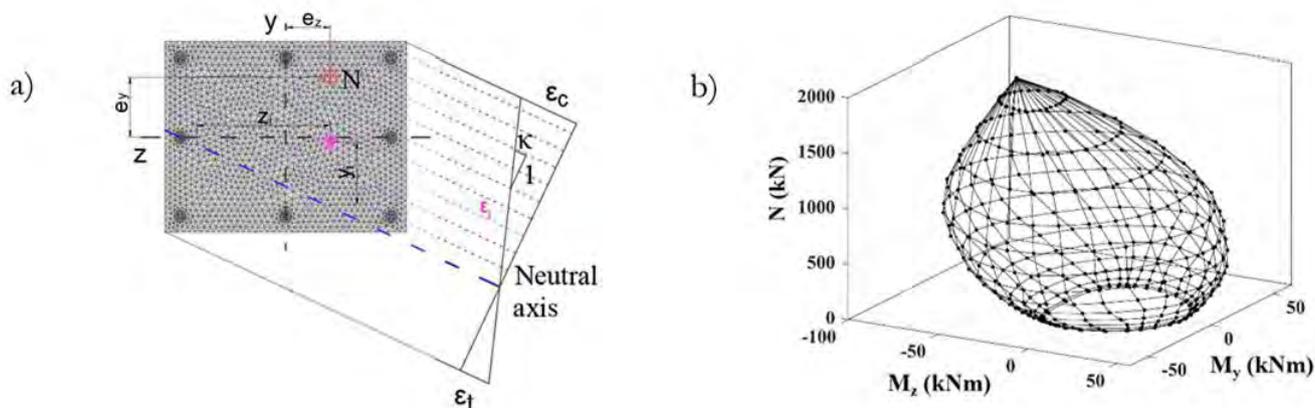


Figura 1. a) Malla seccional y distribución de deformaciones; b) Vista 3D de una superficie de interacción.

no incluye ningún método simplificado de diseño específico. Hasta la fecha, no se han encontrado datos experimentales a altas temperaturas para pilares de HA en flexión biaxial.

Por tanto se ha desarrollado un modelo numérico con integración por fibras para la evaluación en situación de incendio de columnas de hormigón armado sujetas a flexión biaxial. Con este modelo se pueden obtener los diagramas 2D y 3D. A continuación se describe el modelo y su validación.

2.1 Descripción

El modelo se desarrolla en MatLab [13] y con él es posible llevar a cabo un análisis termo-mecánico secuencialmente acoplado. Este análisis consiste en dos pasos: (1) Se realiza un análisis térmico seccional para obtener el campo de temperaturas para un tiempo dado de exposición al fuego; (2) Se resuelve el problema mecánico considerando el estado térmico de la sección obtenido en el paso anterior. Para el problema de transmisión de calor se adoptan los valores recomendados en EN 1991-1-2 [14]. Para obtener las temperaturas seccionales, se aplica el método de diferencias finitas propuesto por Lie y Irwin [15].

Para el análisis mecánico, la sección se malla triangularmente (Figura 1a) y cada celda se caracteriza por su posición, su temperatura (mediante interpolación lineal) y por las propiedades del material. En este caso, tanto para el hormigón como para el acero, se utilizan las propiedades térmicas y mecánicas dadas por EN 1992-1-2 [12].

Se adopta la hipótesis de Navier-Bernoulli donde una sección plana permanece plana y normal al eje neutro en flexión (Figura 1a). La curvatura de la sección (κ) se obtiene de la distribución de deformaciones totales (las mecánicas son las totales menos las térmicas). El estado tensional de cada celda se obtiene con la ecuación constitutiva del material a la temperatura correspondiente. Para una carga aplicada N y, a través de un proceso iterativo, se actualiza la posición del eje neutro basado en el equilibrio de fuerzas de Eq. (1):

$$\sum_{i=1}^n A_i \sigma_i - N = 0 \quad (1)$$

donde A_i es el área de la celda i (mm^2), σ_i es la tensión de la celda i (N/mm^2) y N es la carga axial aplicada (N).

La capacidad a flexión se obtiene tras resolver la Eq. (2) y la Eq. (3) incrementando gradualmente el valor de la curvatura seccional para generar la curva $M-\kappa$:

$$\sum_{i=1}^n A_i \sigma_i z_i - M_y = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i \sigma_i z_i - M_z = 0 \quad (3)$$

donde y_i y z_i son, respectivamente, la posición en y y en z del centroide de la celda i (mm); y M_y y M_z son, respectivamente, el momento aplicado en y y en z (Nmm).

Para obtener la superficie de interacción, el modelo genera todas las posibles situaciones de carga mediante la rotación del eje neutro y el incremento de la carga axial desde 0 hasta el valor de la resistencia plástica seccional (N_{pl}). En la Figura 1b se muestra una de estas superficies 3D para un pilar de HA expuesto por tres caras a la curva ISO 834 [14].

2.2 Validación térmica

El modelo térmico se valida con temperaturas experimentales de los ensayos de Lie y Irwin [15] y Kodur *et al.* [16]. En la validación, las predicciones para puntos internos de la sección del hormigón a diferentes tiempos de exposición al fuego se comparan con los valores experimentales. Como ejemplo, en la Figura 2 se muestra la validación para uno de los pilares. Los puntos yacen generalmente dentro de las fronteras $\pm 15\%$. La precisión del modelo aumenta para temperaturas mayores de 400°C . Más detalles sobre el modelo y la validación pueden encontrarse en Peña *et al.* [17].

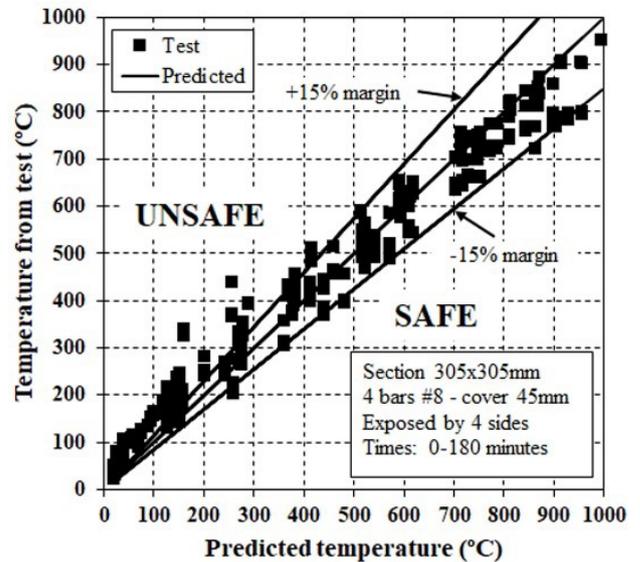


Figura 2. Tests vs. Predicción Col. 1 Lie and Irwin [15].

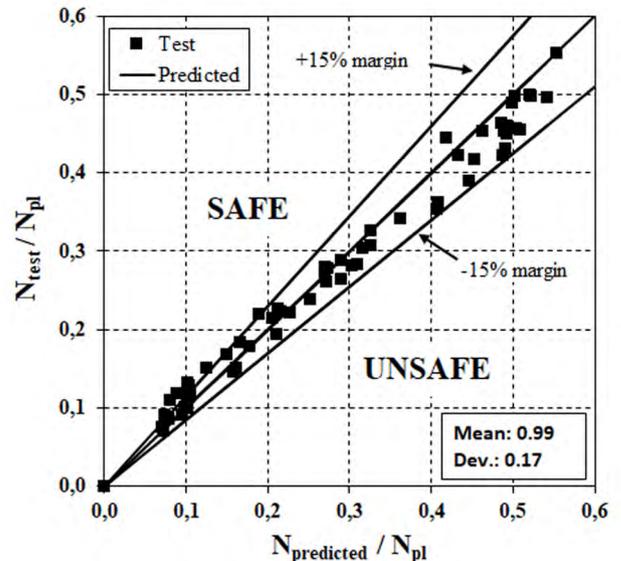


Figura 3. Tests vs. Predicciones [17].

2.3 Validación mecánica

Debido a la falta de experimentos en pilares a flexión biaxial expuestos a fuego, la validación del modelo mecánico se acomete en dos partes: (1) Validación a temperatura ambiente a flexión biaxial y (2) Validación a altas temperaturas bajo flexión

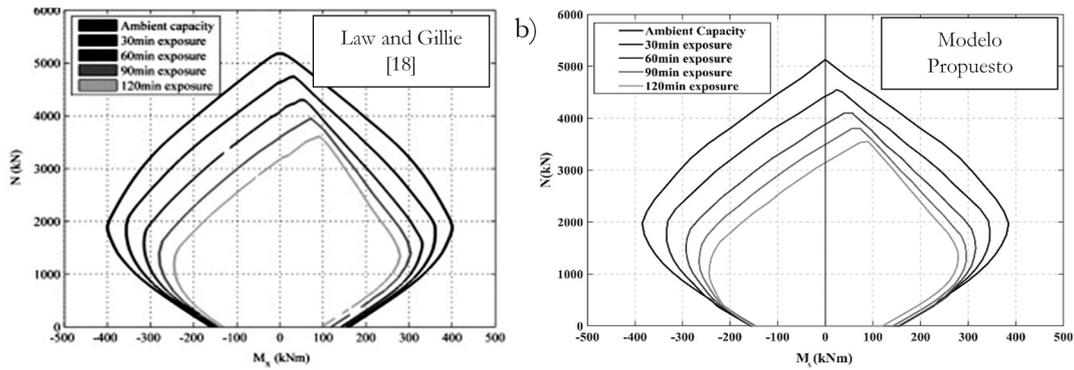


Figura 4. Diagramas de interacción uniaxiales para diferentes tiempos de exposición al fuego.

uniaxial. Para la validación a temperatura ambiente se emplean los resultados experimentales de varios estudios como se puede consultar en [17]. La Figura 3 muestra la buena correlación que existe para los 61 casos validados (Media=0.99, SD=0.17).

Para la validación a altas temperaturas bajo flexión uniaxial, las predicciones del modelo se contrastan con las dadas por el modelo de Law y Gillie [18]. El pilar tomado como referencia (300x500mm, 6φ20) está expuesto a la curva ISO 834 [14] por tres lados. En la Figura 4 puede observarse como las predicciones de ambos modelos son idénticas. Por tanto, la capacidad de predicción del modelo se considera satisfactoria.

3. APLICACIÓN DEL MODELO A LA EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL SPALLING

En este estudio se consideran columnas de HA expuestas uniformemente por sus cuatro caras a la curva de fuego estándar. En primer lugar, se obtiene la evolución temporal del mapa térmico de la sección y cuando se produce el *spalling*, esto se refleja en el modelo mediante la eliminación de las fibras de hormigón afectadas (Figura 5). Los parámetros que determinan esta eliminación se fijan de acuerdo a lo concluido tras el estudio de la bibliografía más relevante en cuanto al momento en el que ocurre y profundidad de hormigón afectada. En este estudio, para esta último se ha considerado que la mitad del perímetro de la armadura de la esquina queda expuesto directamente al fuego. Por la pérdida seccional debida al *spalling*,

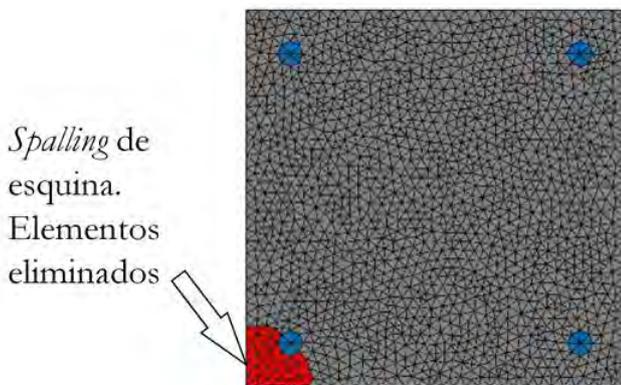


Figura 5. Modelización del spalling en esquina.

ling, la simetría tanto térmica como geométrica de la sección que se tenía inicialmente se pierde. Por tanto, la obtención de temperaturas debe actualizarse para las nuevas condiciones de contorno dadas por eliminación de los elementos afectados. Además, este desprendimiento del hormigón deja expuesta la armadura. La nueva asimetría geométrica de la sección por la aparición del *spalling* obliga a la resolución, en cualquier caso, de un problema de flexión biaxial. Así, el modelo secuencial se encarga de obtener el mapa térmico seccional de la sección con *spalling* y, a continuación, su nueva respuesta mecánica.

Para realizar el estudio se toma como referencia una sección de HA-30 de 300x300 mm con un armado de 4Φ16 y con recubrimiento geométrico de 35 mm. El parámetro que se varía es el tiempo de ocurrencia del *spalling*. Los tiempos evaluados son de 10, 15, 20 y 30 min desde el inicio del calentamiento, que se produce uniformemente por las cuatro caras y sigue la curva ISO 834 [14]. En la Figura 6 se muestra el mapa térmico seccional a los 30, 60 y 90 min de exposición al fuego cuando se ha producido *spalling* de esquina.

Se observa como en la esquina donde ocurre el *spalling*, la armadura queda expuesta y se calienta mucho más rápidamente que en las otras tres esquinas, como era de esperar.

En la gráfica de la Figura 7 se presenta la evolución de la temperatura en la armadura directamente expuesta al fuego por el *spalling* para diferentes tiempos de iniciación del mismo (10, 20 y 30 min). Se observa claramente un aumento de la velocidad de calentamiento en el momento en el que ocurre el *spalling*. Sin embargo, el efecto del tiempo de iniciación es menos notable a medida que aumenta el tiempo de exposición al fuego, la diferencia de las temperaturas entre las curvas con *spalling* es cada vez menor y, sobre los 45 minutos, las tres curvas se superponen.

Esto pone de manifiesto que para este caso, al menos que se evalúe una resistencia al fuego menor de 45 min, el tiempo de iniciación no tiene influencia.

Este resultado se corrobora al observar la respuesta mecánica de la sección de HA para una R60 considerando los diferentes tiempos de iniciación del *spalling*. En la Figura 8 se muestra las diferentes superficies de interacción y se observa como todas ellas se superponen, lo que implica la misma capacidad seccional para todos los casos estudiados.

A partir de las superficies de interacción, que se pueden obtener para cualquier tiempo de resistencia al fuego, es posible extraer los diagramas de interacción M_y y M_z para el nivel de carga deseado, cuyo axial asociado viene dado por la Eq. (4):

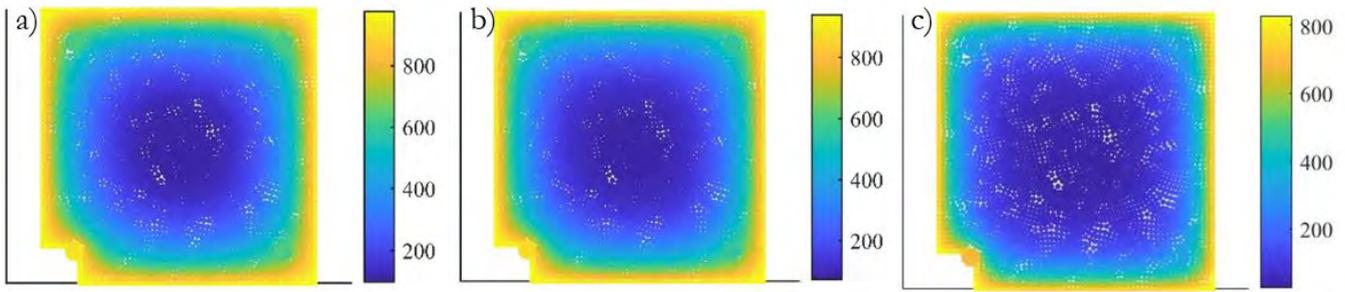


Figura 6. Mapas térmicos seccionales: a) 30 min; b) 60 min; c) 90 min.

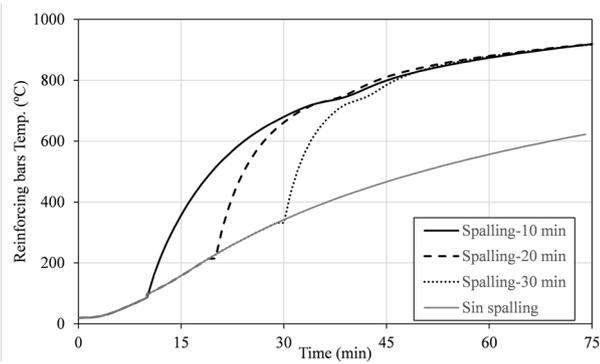


Figura 7. Temperatura de la armadura expuesta.

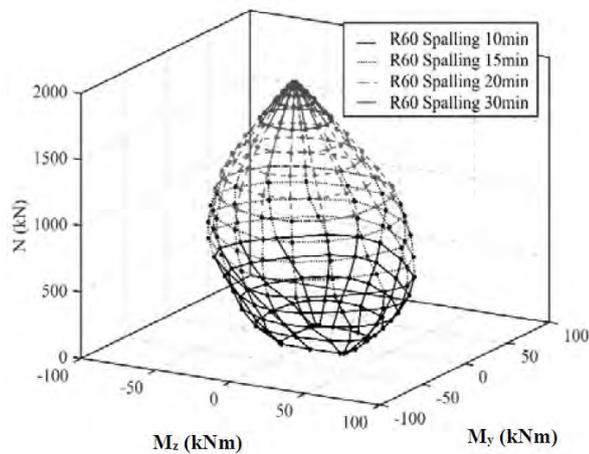


Figura 8. Superposición de las superficies de interacción para R60.

$$N = \mu b h f_{ck} \quad (4)$$

donde N es la carga axial (N); μ es el nivel de carga, b es el ancho de la sección (mm), h es el canto de la sección (mm) y f_{ck} es la resistencia característica a compresión del hormigón (MPa).

Así pues, para un mismo nivel de carga, esta representación permite comparar los diagramas de interacción de la misma sección para situaciones con y sin *spalling*. De este modo, se puede evaluar la pérdida de resistencia al fuego que genera este fenómeno al encontrar el diagrama de interacción de la sección sin *spalling* que coincide, en el cuadrante más desfavorable, con la envolvente del diagrama de interacción de la sección cuando esta sí que ha sufrido *spalling* en su calentamiento.

Por ejemplo, en la Figura 9, se muestran en línea discontinua el diagrama de interacción para una R30 de una sección

donde ha habido. Este diagrama se obtiene al realizar un corte en la superficie de interacción 3D a la altura del axil correspondiente a un nivel de carga de 0.4 (en este caso, 1080 kN). En el mismo gráfico, en línea continua está graficado el diagrama de interacción de la misma sección pero sin ocurrencia de *spalling* para el mismo nivel de carga y para un R50. Al no haber *spalling*, se observa que este diagrama es simétrico.

Como se puede observar, en el primer cuadrante, ambos diagramas coinciden en la zona más desfavorable del diagrama de R30 con *spalling*. Esto quiere decir que la situación más perjudicial en cuanto a comportamiento mecánico seccional para un R30 con *spalling* equivale a la resistencia mecánica en situación de incendio que se tendría tras 50 min de exposición (R50) si no produjera dicho fenómeno. Por tanto, el efecto del *spalling* equivale a prolongar el calentamiento de la sección durante 20 min más.

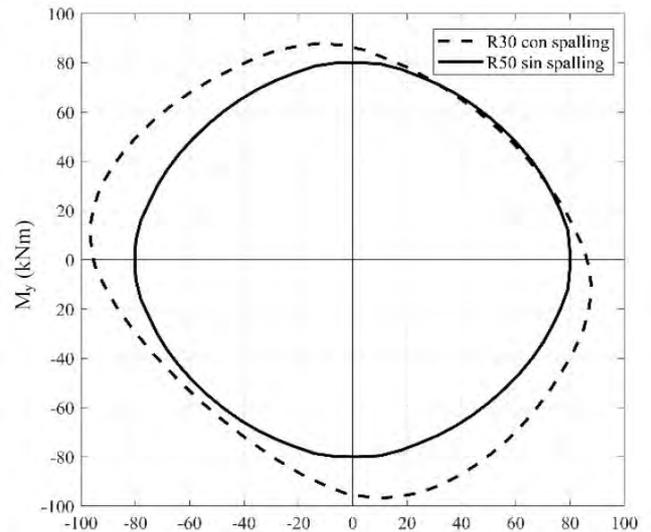


Figura 9. Diagrama de interacción R30 $\mu=0.4$.

Otro ejemplo del mismo tipo se presenta en la Figura 10. En este caso la línea discontinua es el diagrama de interacción tras 60 minutos de exposición al fuego (R60) en la sección de HA con ocurrencia de *spalling*. En discontinuo se muestra la capacidad mecánica que tendría la sección si no sufriese *spalling* tras 80 min de exposición al fuego (R80). Del mismo modo que antes, se observa que en el cuadrante más desfavorable para R60, ambos diagramas coinciden en el punto más crítico.

Estas observaciones indican que, al menos hasta tiempos de exposición al fuego de 60 min, el efecto negativo de la ocu-

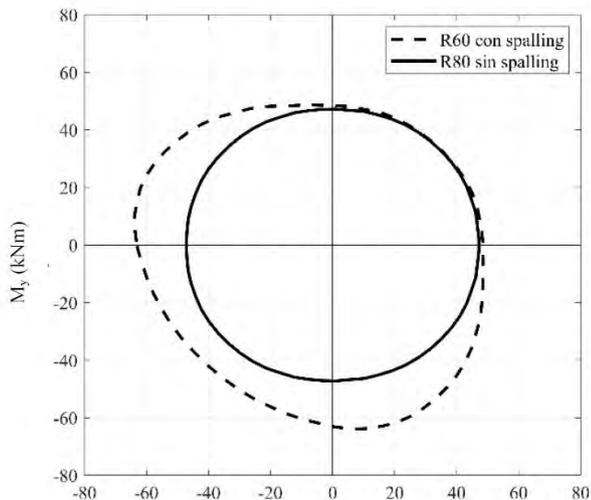


Figura 10. Diagrama de interacción R60 $\mu= 0.4$.

rencia del *spalling* equivale a una prolongación de 20 min en el tiempo de exposición al fuego de la sección de HA calentada uniformemente por sus cuatro caras y sin la ocurrencia de *spalling*.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un modelo que permite obtener la capacidad mecánica seccional de pilares de HA en situación de incendio y sujetos a flexión biaxial en los que durante el calentamiento ocurre *spalling* en una de sus esquinas.

Del presente trabajo, estas son las conclusiones que se pueden extraer:

- El modelo secuencialmente acoplado es capaz de generar las superficies de interacción que representan la capacidad mecánica de secciones de HA bajo flexión biaxial y ante la ocurrencia de *spalling*.
- Ante un *spalling* de esquina, la temperatura de la armadura expuesta crece mucho más rápidamente que cuando mantiene el recubrimiento.
- Tanto la capacidad mecánica de la sección como la temperatura en la armadura expuesta son sensibles al tiempo de iniciación del *spalling* al principio del calentamiento. A partir de los 45 min, este parámetro no influye.
- Para un nivel de carga dado y un tiempo de exposición al fuego de una sección con *spalling*, es posible encontrar el diagrama de la sección sin *spalling* que es equivalente en el cuadrante más desfavorable.
- El efecto negativo del *spalling* en una sección de HA equivale a prolongar 20 min el calentamiento de una sección sin *spalling* bajo la curva ISO 834.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer los fondos recibidos por *the National Agency for Research and Development (ANID)/Scholarship Program/DOCOTRADO BECAS CHILE/2018·(R)72190104*, para el desarrollo de la investigación del primer autor en la Universitat Politècnica de València.

Referencias

- [1] G.A. Khoury, Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*.2 (2000) 429-447
- [2] J.C. Dotreppe, J.M. Franssen, Y. Vanderzeipen, Calculation Method for Design of Reinforced Concrete Columns under Fire Conditions. *American Concrete Institute*. 96(1) (1999) 9-18.
- [3] A.M. Gil, B. Fernandes, F.L. Bolina, B.F. Tutikian, Experimental analysis of the spalling phenomenon in precast reinforced concrete columns exposed to high temperatures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 11(4) (2018) 856-875.
- [4] R. Jansson, Fire spalling of concrete – A historical overview, *MATEC Web of Conferences*. (2013) 6, 01001.
- [5] CEB-FIB: Fire design of concrete structures- materials, structures and modelling, State-of- the-art, Bulletin 38. *International Federation for Structural Concrete (fib)* (2007)
- [6] K.D. Hertz, Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal* 38 (2003) 103- 116
- [7] M.B. Dwaikat, V. Kodur, Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems. *Fire safety Journal*. 44(3) (2009) 425–434.
- [8] B.B.G. Lottman, E.A.B. Koenders, C.B.M. Blom, J.C. Walraven, Spalling of concrete due to fire exposure: A coupled fracture mechanics and pore pressure approach. *MATEC Web of Conferences* (2013) 6, 05002.
- [9] S.H. Buch, U. K. Sharma, Fire resistance of eccentrically loaded reinforced concrete columns. *Fire Technology* 55(2019) 1517- 1552
- [10] L. Wang, R. Van Coile, R. Caspeele, L. Taerwe, Simplified method for evaluating the biaxial capacity of rectangular reinforced concrete columns during fire, *Materials and Structures*, 50 (2017) 1–13.
- [11] V. Kodur, N. Raut, A simplified approach for predicting fire resistance of reinforced concrete columns under biaxial bending, *Engineering Structures*, 41 (2012) 428–443.
- [12] CEN., 2004b. EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures, Part 1.2: General rules – Structural fire design, Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation.
- [13] MATLAB, 2018. Natick: The MathWorks Inc.
- [14] CEN., 2002. EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures, Part 1.2- Actions on structures exposed to fire, Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation.
- [15] T.T. Lie, R.J. Irwin, Evaluation of the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross- sections, Internal Report, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada (NRCC), Ottawa, Canada (1990).
- [16] V. Kodur, F. Cheng, T. Wang, J. Latour, P. Leroux, Fire Resistance of High-Performance Concrete Columns, Internal Report, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada (NRCC), Ottawa, Canada (2001).
- [17] D. Peña, V. Albero, A. Hospitaler, C. Ibañez, A. Espinos, M. L. Romero, Reinforced concrete columns exposed to fire: evaluation of the fire resistance under biaxial bending conditions, *Applications of Structural Fire Engineering*, (2019).
- [18] A. Law, M. Gillie, Interaction diagrams for ambient and heated concrete sections, *Engineering Structures*, 32(6) (2010) 1641– 1649.