

MODELACIÓN COMPUTACIONAL DEL PUNZONAMIENTO EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

COMPUTATIONAL MODELING OF PUNCHING IN REINFORCED CONCRETE SLABS SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURES

Illarick Balarezo^a, Paula Folino^a, Marianela Ripani^{a,b} y Hector Ludzik^a

^aLaboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería (LMNI-LAME), Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN), CONICET - UBA, Argentina. jbalarzo.ext@fi.uba.ar

^bDepartamento de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur (UNS). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Entrepisos sin vigas de hormigón armado, Punzonamiento, Altas Temperaturas, Modelación constitutiva

Resumen. Este trabajo se enfoca en el análisis de la resistencia a punzonado en entrepisos sin vigas. La falla por punzonado se caracteriza por ser sumamente frágil. La exposición a un incendio, puede reducir sustancialmente la resistencia a punzonado debido a la degradación de las propiedades mecánicas de los materiales. En este trabajo se estudia la evolución de la resistencia al punzonamiento de un sistema losa-columna frente a la exposición a altas temperaturas mediante un modelo de elementos finitos 3D implementado en ABAQUS. Para representar el comportamiento termo-mecánico del hormigón se utiliza un modelo de plasticidad con daño dependiente de la temperatura, el cual es calibrado y luego validado con datos experimentales extraídos de la literatura. Los resultados obtenidos permiten estimar la caída de resistencia a punzonado al aumentar la temperatura y realizar un análisis de sensibilidad de los distintos parámetros que intervienen en el modelo.

Keywords: Reinforced Concrete Flat slabs, Punching, High Temperatures, Constitutive modeling.

Abstract. This work focuses on the analysis of the punching strength of Reinforced Concrete flat slabs. Punching shear failure is characterized by being extremely fragile. The exposure to a fire can substantially reduce punching strength due to the degradation of the mechanical properties of the materials. In this work, the evolution of the punching strength of a slab-column system against exposure to high temperatures is studied using a 3D finite element model implemented in ABAQUS. To represent the thermo-mechanical behavior of concrete, a temperature-dependent damage plasticity model is used, which is calibrated and then validated with experimental data extracted from the literature. The results obtained allow to estimate the drop in punching strength with the increase of temperature and to perform a sensitivity analysis of the different parameters involved in the model.

1. INTRODUCCIÓN

Los entrepisos sin vigas de hormigón armado son ampliamente utilizados en el diseño estructural de obras civiles debido, entre otras cosas, a la flexibilidad que ofrecen para la ubicación de instalaciones y a su velocidad constructiva debido a la simplicidad de los encofrados. En esta tipología estructural, los esfuerzos de punzonado pueden ser determinantes en el diseño, condicionando espesores de losas y dimensiones de columnas. La falla por punzonamiento es sumamente frágil, es decir, es una falla abrupta y sin previo aviso. Por lo tanto, sus consecuencias suelen ser trágicas, más aún, si las estructuras están sometidas a altas temperaturas, como en el caso de incendios, donde los materiales sufren una degradación de sus propiedades mecánicas.

Existen diversas investigaciones basadas en estudios experimentales que evalúan este tipo de falla frágil a temperatura ambiente. En [Adetifa y Polak \(2005\)](#) se analiza un sistema losa columna a escala real con el fin de hallar las cargas y desplazamientos máximos que se manifiestan en la falla por punzonamiento y analizar como evoluciona el mecanismo de falla. Sin embargo, la literatura asociada a trabajos experimentales sobre este fenómeno en combinación con temperaturas elevadas es muy escasa ([Smith et al., 2015](#)). En cuanto a estudios numéricos del punzonamiento a temperatura ambiente existe una cantidad más amplia de trabajos, entre ellos pueden citarse [Navarro et al. \(2018\)](#) y [Genikomsou y Polak \(2015\)](#), y considerando la acción de las altas temperaturas en la modelación numérica de la resistencia a punzonado a [Al Hamd \(2018\)](#) y [Wahid et al. \(2019\)](#).

Este trabajo se centra en analizar la influencia de las altas temperaturas en la resistencia al punzonamiento en la unión de un sistema losa-columna de hormigón armado. Para tal fin se realizará un análisis computacional en el entorno del programa comercial [Abaqus \(2014\)](#), basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF) y utilizando un modelo constitutivo de daño plástico para el hormigón. En primer lugar se describirá brevemente el estudio experimental realizado por [Adetifa y Polak \(2005\)](#) para evaluar la falla a punzonamiento por corte a temperatura ambiente. En base a los resultados experimentales de ([Adetifa y Polak, 2005](#)) se calibrarán los parámetros de entrada del modelo constitutivo/numérico a temperatura ambiente. Posteriormente, se incorporará en el modelo la dependencia de las propiedades mecánicas y térmicas tanto del hormigón como del acero en función de la temperatura y se realizará un análisis de transferencia de calor sobre el modelo. Finalmente, se obtendrán predicciones de las curvas carga vs desplazamiento y de la degradación de la resistencia al punzonado frente a la acción de altas temperaturas.

2. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO EXPERIMENTAL TOMADO COMO BASE

Para evaluar el comportamiento a punzonamiento a temperatura ambiente en losas de hormigón armado, con y sin armadura a corte, se tomará como base el ensayo experimental de un espécimen en escala real incluido en [Adetifa y Polak \(2005\)](#). Las dimensiones tanto de la columna como de la losa, dadas en términos de "lado x lado x altura" eran de 150 x 150 x 420mm y 1800 x 1800 x 120mm, respectivamente. En cuanto a las características de los materiales, la resistencia a compresión uniaxial (f'_c) y a tracción uniaxial (f'_t) del hormigón eran de 44MPa y 2.2MPa, respectivamente, mientras que la tensión de fluencia del acero (f_y) era de 455MPa. Cabe destacar que el tamaño máximo del agregado grueso empleado en el hormigón era de 10mm.

En las Figuras (1) y (2) se muestra la geometría del conjunto losa columna de hormigón armado ensayada por [Adetifa y Polak \(2005\)](#). Las medidas están dadas en milímetros. En cuanto a

la vinculación, la losa estaba apoyada en todos los bordes sobre soportes de neoprene. Respecto al armado, en la columna se dispusieron 4 barras de 20mm de diámetro y estribos de 8mm de diámetro. En la losa se dispusieron 2 mallas de acero, una en la cara superior (zona de compresión) y otra en la cara inferior (zona de tracción). Ambas mallas con barras de acero de 10 mm de diámetro en ambas direcciones x y z. La malla superior posee una separación entre barras de 200 mm, mientras que en la malla inferior la separación es de 100 mm. La carga fue aplicada en la columna mediante desplazamientos a través de un dispositivo hidráulico.

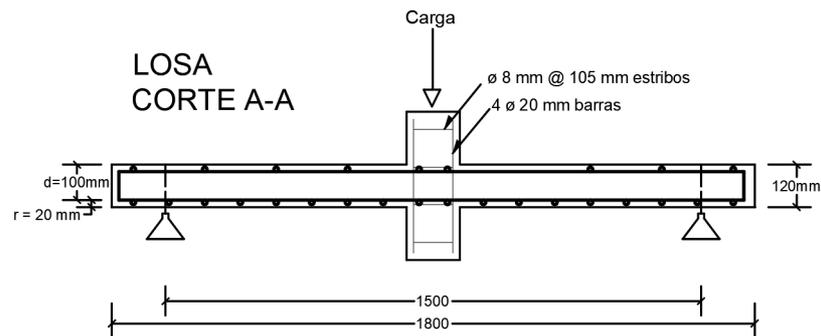


Figura 1: Sección transversal del conjunto losa columna.

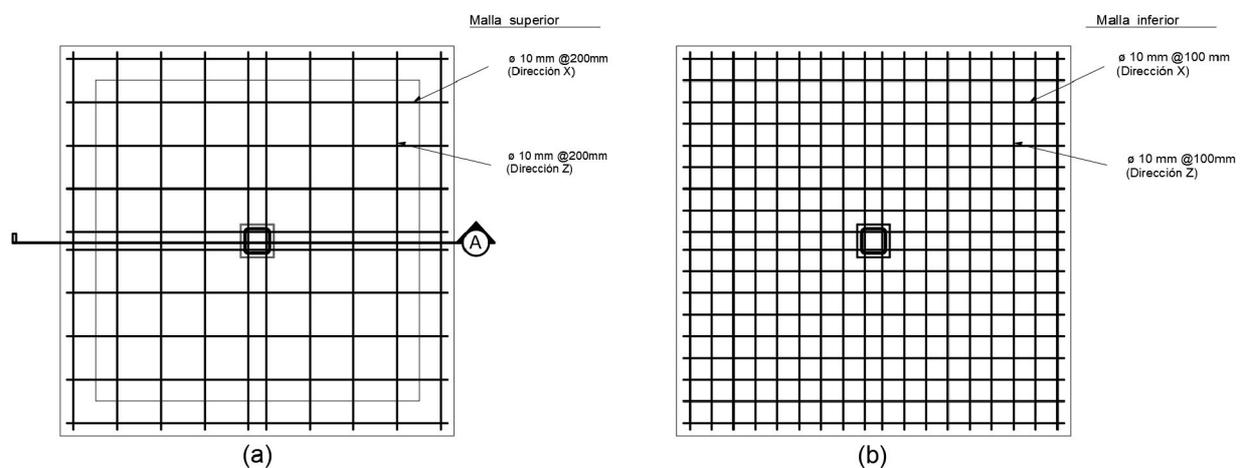


Figura 2: Vista en planta del armado de la losa: (a) cara superior y (b) cara inferior

3. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA A TEMPERATURA AMBIENTE

Para simular el ensayo de [Adetifa y Polak \(2005\)](#), y teniendo en cuenta la doble simetría del conjunto solo se modeló un cuarto de la estructura en análisis. En la Figura (3), se muestran las condiciones de vínculo y la zona de aplicación de los desplazamiento impuestos. Se utilizaron elementos finitos sólidos hexaédricos de 8 nodos, tipo C3D8R, para modelar la losa de hormigón y elementos barra, tipo 3D2, para las barras de acero. Cabe destacar que se consideró adherencia perfecta en la interfase entre el hormigón y la armadura de acero.

Para modelar el comportamiento del hormigón, se utilizó el modelo de plasticidad de daño (CDP - Concrete Damage Plasticity) provisto por ABAQUS ([Abaqus, 2014](#)). Este modelo fue

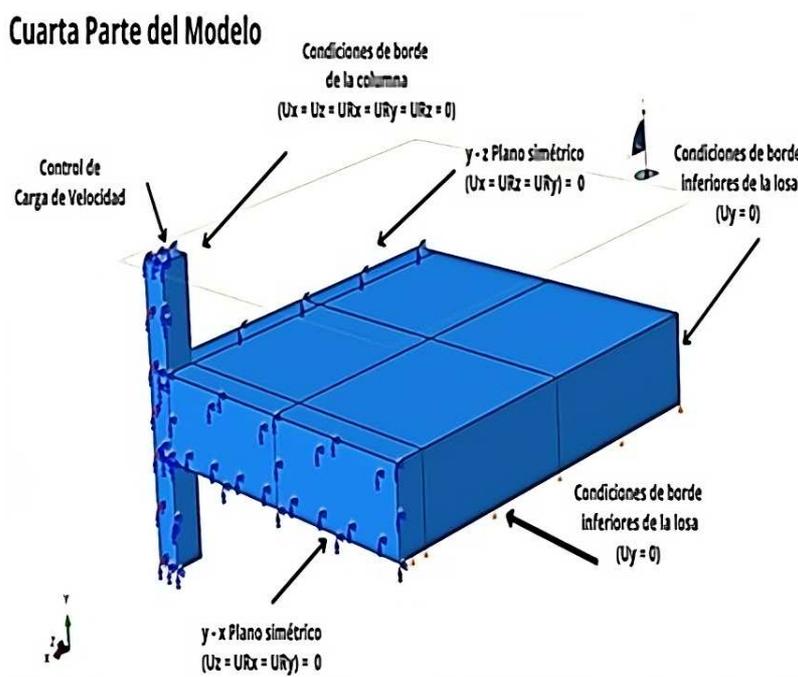


Figura 3: Características geométricas del modelo implementado

propuesto originalmente por [Lubliner et al. \(1989\)](#) y posteriormente modificado por [Lee y Fenves \(1998\)](#) para introducir el daño. En la Ecuación (1) está dada la expresión de la superficie de fluencia del modelo CDP, donde $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ es la deformación plástica equivalente a compresión, $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ es la deformación plástica equivalente a tracción, \bar{q} es la presión hidrostática efectiva, \bar{p} es la tensión efectiva equivalente de Von Mises y $\hat{\sigma}_{max}$ es la tensión efectiva principal máxima, siempre positiva.

$$F = \frac{1}{1 - \alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}; \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \langle \hat{\sigma}_{max} \rangle - \gamma \langle -\hat{\sigma}_{max} \rangle) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \leq 0 \quad (1)$$

En la Figura (4) puede verse claramente la forma que adopta la expresión de la Ec. (1) para un estado plano de tensiones.

Cabe aclarar que los parámetros de daño asociados al modelo CDP son funciones escalares que varían entre 0 y 1, donde 0 indica la inexistencia de daño y 1 corresponde a un material completamente dañado. Para evitar problemas numéricos, en este trabajo el valor máximo de daño se fijó en 0.98. Las expresiones propuestas por [Hafezolzghorani et al. \(2017\)](#) para el daño por compresión (d_c) y por tracción (d_t) están dadas en la ecuación (2), donde σ_c y σ_t son las tensiones de compresión y tracción actuantes, respectivamente, y σ_{cu} y σ_{to} las tensiones de compresión y tracción últimas, respectivamente.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{to}} \quad (2)$$

El modelo CDP también requiere la entrada de las curvas tensión-deformación uniaxial a compresión y tracción del hormigón. Para la curva de compresión uniaxial se definieron tres regiones según lo propuesto por [Krätzig y Pölling \(2004\)](#): (1) una región lineal hasta una tensión equivalente al 40% de la tensión máxima o pico (f_{cm}), (2) una región de endurecimiento parabólico hasta f_{cm} y su deformación asociada (ε_{cm}), y (3) una región de ablandamiento hiperbólico. En cuanto a la curva de tracción se definieron dos regiones según la propuesta de

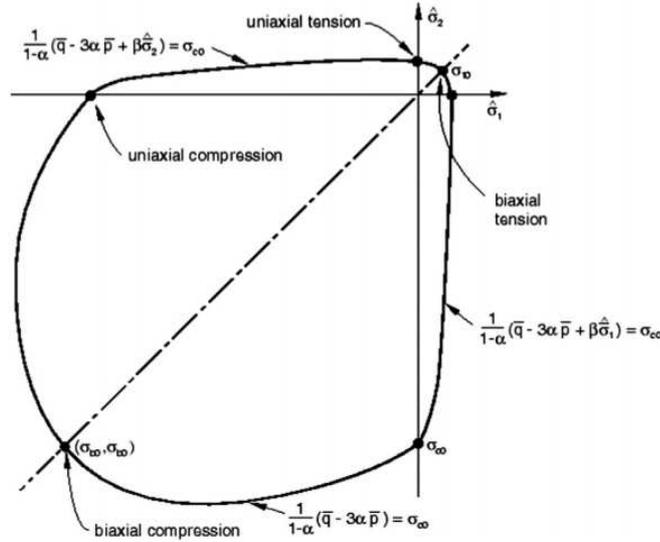


Figura 4: Superficie de fluencia del modelo CDP en estado plano de tensiones, (Abaqus, 2014).

Krätzig y Pölling (2004): (1) un comportamiento elástico lineal hasta la tensión pico y (2) una región ablandamiento post-pico con comportamineto lineal o exponencial y dependiente de la energía de fractura y de una longitud equivalente. En la Figura (5), se muestran las curvas mencionadas. Por otra parte, para el comportamiento mecánico unidimensional del acero se utilizó un diagrama bilineal con comportamiento rígido plástico.

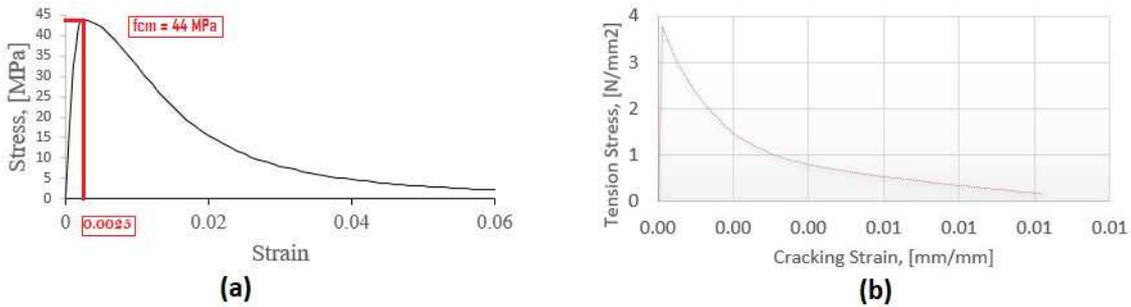


Figura 5: Curva tensión vs deformación específica uniaxial para (a) compresión y (b) tracción (Krätzig y Pölling, 2004).

Las propiedades materiales utilizadas en el modelo numérico para el ensayo a punzonamiento a temperatura ambiente, están dadas en las Tablas (1) y (2), donde E es el módulo de elasticidad, f'_c es la resistencia a compresión uniaxial del hormigón, ν es el coeficiente de Poisson, ρ es la densidad, f_y es la tensión de fluencia del acero, y ε_y y ε_t son las deformaciones específicas de fluencia y última del acero, respectivamente.

E [MPa]	f'_c [MPa]	ν [-]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]
44000	44	0.2	2400

Tabla 1: Propiedades materiales del hormigón.

De modo similar al ensayo real, en el modelo computacional los esfuerzos se aplicaron mediante desplazamientos impuestos en la columna. Para esto, se utilizó un método de resolución

E [MPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ν [-]	ρ [$\frac{kg}{m^3}$]	ε_y [-]	ε_t [-]
200000	455	650	0.3	7850	0.023	0.25

Tabla 2: Propiedades materiales del acero.

explícita que ofrece el programa [Abaqus \(2014\)](#) para la resolución de problemas dinámicos de baja velocidad de carga. En este sentido, se forzó a la energía cinética del sistema a mantenerse por debajo del 1 % del valor de la energía interna con el fin de simular un evento cuasi-estático y evitar efectos cinemáticos considerables ([Yacila et al., 2019](#); [Genikomsou y Polak, 2015](#); [Navarro et al., 2018](#)). El valor máximo de desplazamiento se fijó en 20mm.

3.1. Calibración del modelo numérico a temperatura ambiente

Para calibrar los parámetros del modelo material a temperatura ambiente se buscó simular el patrón de fisuración obtenido en el ensayo de [Adetifa y Polak \(2005\)](#) a través del análisis cualitativo del daño en la losa, para un desplazamiento máximo de 20mm. Los parámetros finalmente adoptados se resumen en la Tabla (3), donde ε es la excentricidad, K_c es el umbral de la superficie de fluencia, Ψ es el ángulo de dilatancia, $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ es la relación entre la tensión en el límite elástico inicial en compresión biaxial y el límite elástico inicial en compresión uniaxial y μ es un parámetro de viscosidad. En la Figura (6) puede verse el patrón de daño obtenido computacionalmente en comparación con el patrón de fisuración obtenido experimentalmente por [Adetifa y Polak \(2005\)](#). Cabe destacar que se modeló un cuarto del espécimen experimental, tal como se indica en la Figura (6).

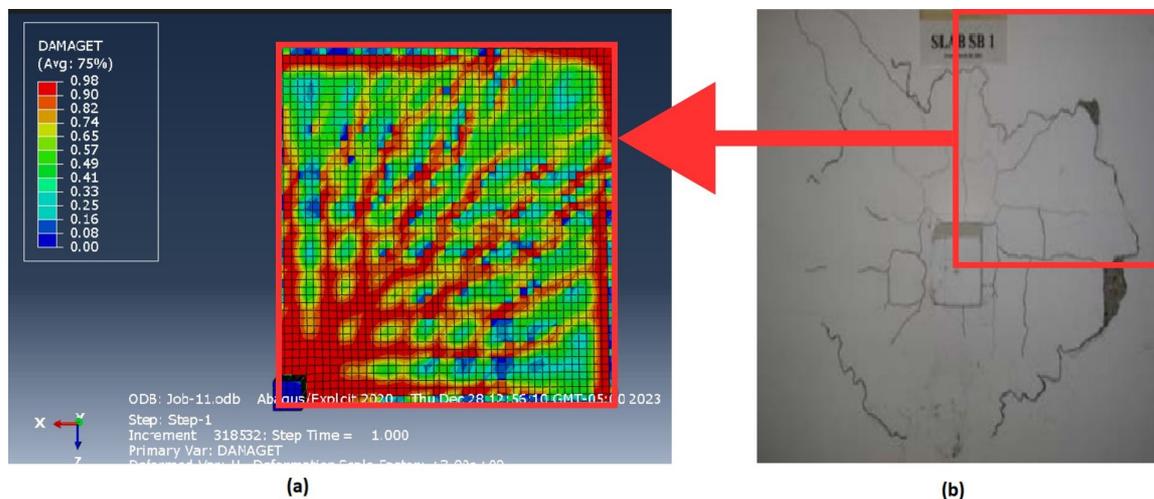


Figura 6: Patrón de fisuración obtenido en: (a) modelación numérica y (b) ensayo experimental ([Adetifa y Polak, 2005](#)).

Finalmente, en la Figura (7) se comparan las curvas carga vs desplazamiento obtenidas para discretizaciones de malla de 15, 20 y 24mm con la curva experimental de [Adetifa y Polak \(2005\)](#) y las curvas obtenidas por otros autores de la bibliografía, mediante ensayos numéricos para el mismo caso ([Le Thanh et al., 2022](#); [Rasoul et al., 2019](#); [Navarro et al., 2018](#); [Genikomsou y Polak, 2015](#)). Puede verse que la aproximación de los resultados obtenidos en este trabajo en términos de comportamiento carga vs desplazamiento es adecuada e incluso conservadora.

ε [-]	Ψ [-]	K_c [-]	$\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ [-]	μ [-]
0.1	30	0.667	1.16	0

Tabla 3: Parámetros de entrada del modelo CDP calibrados según el ensayo experimental de [Adetifa y Polak \(2005\)](#).

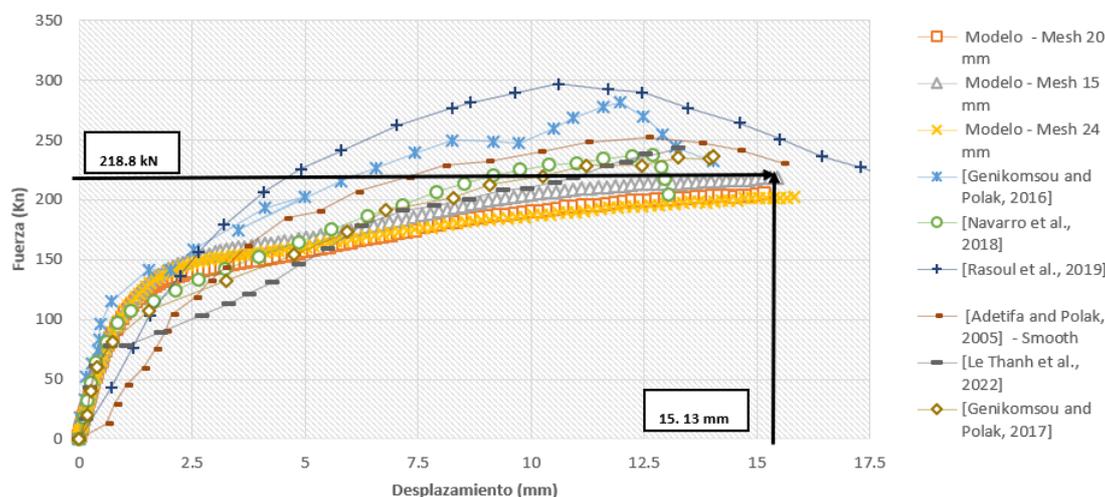


Figura 7: Curvas cargas vs desplazamientos del ensayo de punzonamiento a temperatura ambiente.

4. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA PARA TEMPERATURAS ELEVADAS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se modificará el modelo material calibrado a temperatura ambiente para predecir la respuesta a punzonamiento del conjunto losa columna sujeto a temperaturas elevadas. La discretización de malla elegida fue de 20mm. Para el análisis de transferencia de calor se utilizaron elementos finitos tipo DC3D8 de 8 nodos para para el hormigón, y tipo DC1D2 de 2 nodos para las barras de acero.

Para la ejecución del ensayo térmico se aplicó un flujo de calor en la cara superior de la losa durante 60min según la curva de fuego ISO 834 ([Bosch et al., 2010](#)). Para dicho análisis se adoptó una emisividad térmica del aire (ε) de 0.8, un coeficiente de Stefan-Boltzmann (σ) de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$ y un coeficiente de convección (h) de $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ para la cara superior de la losa, y de $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ para la cara inferior de la losa. Las propiedades térmicas del hormigón y del acero, tales como calor específico, conductividad y expansión térmica se tomaron dependientes de la temperatura según lo dispuesto por el [Comité Europeo de Normalización \(2004\)](#). Posteriormente, el perfil térmico obtenido se importó en el modelo mecánico previamente calibrado a temperatura ambiente.

Para representar el comportamiento mecánico tanto del hormigón como del acero en altas temperaturas, se adoptaron las curvas tensión vs deformación plástica dadas en la Figura (8) basada en la propuesta del [Comité Europeo de Normalización \(2004\)](#). Además, se implementó la extensión del modelo de daño dependiente de la temperatura propuesta por [Lo Monte et al. \(2017\)](#); [Wahid et al. \(2019\)](#) donde se recomienda que, en condiciones de temperaturas elevadas, se adopte un valor del ángulo de dilatación (Ψ) entre 30° y 35° , un parámetro de viscosidad (μ) nulo, y una relación $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$ de 1.16 para $T=20^\circ\text{C}$, de 2.5 para $T=600^\circ\text{C}$ y de 1.8 para $T=750^\circ\text{C}$. Lo cual se cumple según lo adoptado en la Tabla (3).

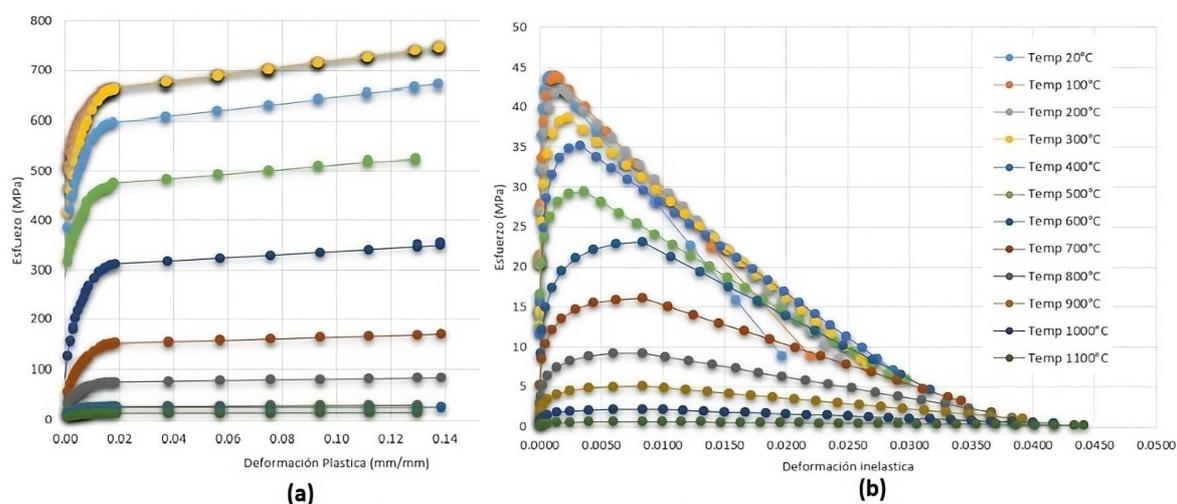


Figura 8: Curvas tensión deformación en compresión uniaxial para (a) hormigón y (b) acero, en altas temperaturas.

Finalmente, en la Figura (9) se muestran los resultados computacionales obtenidos en términos de curvas carga vs desplazamiento para el ensayo de punzonamiento en función de la temperatura. Las curvas roja (Modelo 1) y azul (Modelo 2) corresponden a las predicciones a temperatura ambiente utilizando las curvas tensión deformación unidimensionales propuestas por Krätzig y Pölling (2004) y por el Comité Europeo de Normalización (2004), respectivamente. La curva naranja (Modelo 2 sometido a T) corresponde al ensayo numérico para una temperatura máxima del aire de 1100 °C y aplicando las curvas tensión deformación unidimensional dadas por el Comité Europeo de Normalización (2004). Puede observarse una pérdida de capacidad portante de alrededor del 25 % en el modelo a alta temperatura, respecto de los modelos a temperatura ambiente. En la Figura 10 se observa el patrón de fisuración en la losa, representado por el daño a temperatura elevada para un 25 % de la carga de falla y para la carga de falla. Puede verse claramente en la Figura 10-(a) que, para una carga igual al 25 % de la carga de falla, las fisuras en la losa comienzan a desarrollarse desde el borde de la columna y se propagan radialmente hacia los bordes de la losa. Por otro lado, resulta interesante comparar el daño obtenido en la Figura 10-(b) para la carga de falla a temperatura elevada con el daño obtenido en la Figura 6-(a) para la misma carga a temperatura ambiente. Puede observarse que a temperatura elevada el daño es generalizado en toda la losa.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó por medio de una simulación computacional la degradación de la resistencia a punzonamiento de un entrepiso sin vigas de hormigón armado bajo la acción de las altas temperaturas. En base a la comparación de los resultados obtenidos por el modelo y los resultados experimentales, se demostró que el modelo es capaz de reproducir la resistencia a punzonamiento de la estructura a temperatura ambiente. Posteriormente, en base a las predicciones de las curvas carga-desplazamiento obtenidas para distintas temperaturas elevadas, pudo observarse una reducción de hasta un 25 % con respecto a la resistencia a punzonamiento a temperatura ambiente cuando la temperatura del aire alcanzó un valor máximo de 1000°C. En estas curvas, se observó además una reducción de la rigidez del sistema losa-columna, producto del aumento del daño ocurrido en los materiales debido al incremento de la temperatura.

Uno de los aspectos mas interesantes presentados en el presente trabajo es la incorporación de la dependencia de la temperatura de las variables de entrada del modelo Concrete Damage

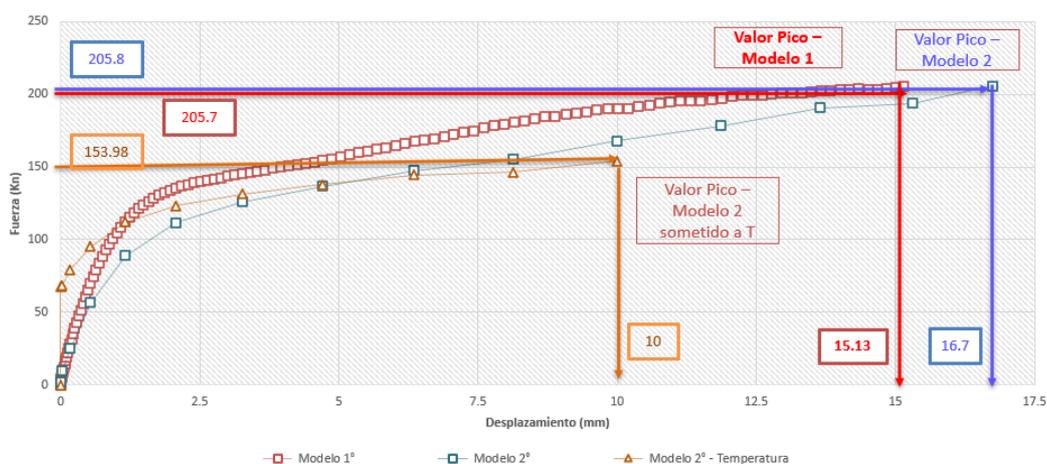


Figura 9: Curvas carga desplazamiento para punzonamiento a temperatura ambiente y en alta temperatura.

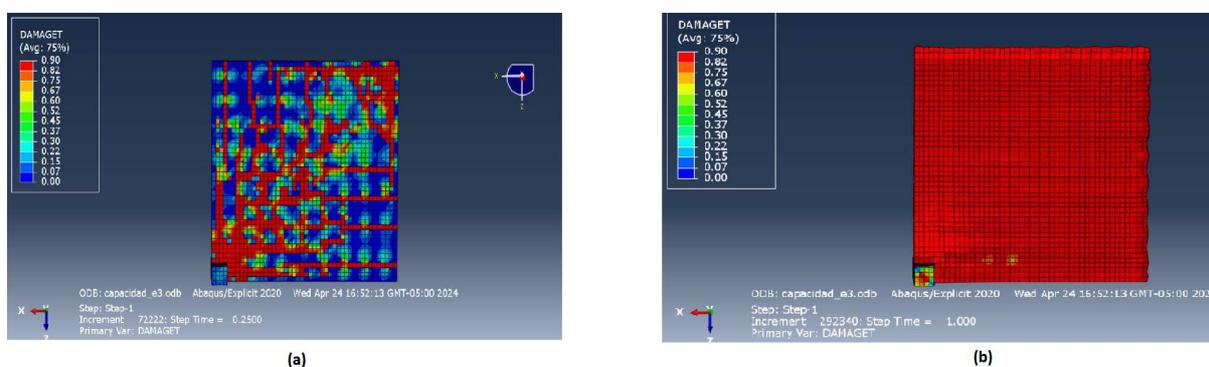


Figura 10: Patrón de fisuración a temperaturas elevadas obtenido para (a) 25 % y (b) 100 % de la carga de falla.

Plasticity (CDP) provisto por el programa comercial ABAQUS.

Los resultados de las predicciones del modelo en altas temperaturas aquí presentadas junto con la validación del modelo, tarea en la que los autores aún se encuentran trabajando, contribuiría en última instancia a una mejor comprensión del fenómeno de punzonamiento en estructuras de hormigón armado sometidas a la acción del fuego, teniendo en cuenta que, las normativas vigentes, tanto nacionales e internacionales, no brindan directrices para el diseño a punzonamiento de estructuras de hormigón armado sometidas a altas temperaturas.

REFERENCIAS

- Abaqus D.S.S.C. *Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14*. 2014.
- Adetifa B. y Polak M.A. Retrofit of slab column interior connections using shear bolts. *ACI Structural Journal*, 102(2):268, 2005.
- Al Hamd R.K.S. *Punching shear in heated interior reinforced concrete slab-column connections*. Tesis de Doctorado, The University of Manchester (United Kingdom), 2018.
- Bosch R., Casafont M., Gavarró P., Gràcia J., Hernández F., Josep B., Marimón F., Nadal R., Pedreny J., Planas E., et al. *La investigació d'incendis i explosions*. Institut de Seguretat Pública de Catalunya, 2010.
- Comité Europeo de Normalización. *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-2: Proyecto de estructuras sometidas al fuego*. AENOR, Madrid, España, 2004.

- Genikomsou A.S. y Polak M.A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in abaqus. *Engineering structures*, 98:38–48, 2015.
- Hafezolghorani M., Hejazi F., Vaghei R., Jaafar M.S.B., y Karimzade K. Simplified damage plasticity model for concrete. *Structural engineering international*, 27(1):68–78, 2017.
- Krätzig W.B. y Pölling R. An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters. *Computers & structures*, 82(15-16):1201–1215, 2004.
- Le Thanh C., Minh H.L., y Sang-To T. A nonlinear concrete damaged plasticity model for simulation reinforced concrete structures using abaqus. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 16(59):232–242, 2022.
- Lee J. y Fenves G.L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics*, 124(8):892–900, 1998.
- Lo Monte F., Kalaba N., Bamonte P., et al. On the extension of a plastic-damage model to high temperature and fire. En *IFireSS 2017-2nd International Fire Safety Symposium*, páginas 703–710. Doppiavoce, 2017.
- Lubliner J., Oliver J., Oller S., y Oñate E. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of solids and structures*, 25(3):299–326, 1989.
- Navarro M., Ivorra S., y Varona F. Parametric computational analysis for punching shear in rc slabs. *Engineering Structures*, 165:254–263, 2018.
- Rasoul Z.M.A. et al. Accuracy of concrete strength prediction behavior in simulating punching shear behavior of flat slab using finite element approach in abaqus. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 7(4):1933–1949, 2019.
- Smith H.K., STRATFORD T., y Bisby L. The punching shear mechanism in reinforced-concrete slabs under fire conditions. *Response of Structures Under Extreme Loading (PROTECT 2015)*, 2015.
- Wahid N., Stratford T., y Bisby L. Calibration of concrete damage plasticity model parameters for high temperature modelling of reinforced concrete flat slabs in fire. *Applications of Structural Fire Engineering, Singapore*, 2019.
- Yacila J., Camata G., Salsavilca J., y Tarque N. Pushover analysis of confined masonry walls using a 3d macro-modelling approach. *Engineering Structures*, 201:109731, 2019.