

ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL PUNZONAMIENTO EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO SOMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

PARAMETRIC ANALYSIS OF PUNCHING IN REINFORCED CONCRETE SLABS SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURES

Illarick Balarezo^{a,b}, Marianela Ripani^{b,c} y Paula Folino^{b,d}

^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú.
pccijbal@upc.edu.pe*

^b*Laboratorio 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.*

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

^d*Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN), CONICET - Universidad de Buenos Aires, ARGENTINA.*

Palabras clave: Hormigón Armado, Punzonamiento, Altas Temperaturas, Modelo de Daño de Hormigón, ABAQUS.

Resumen. Los sistemas de entrepisos sin vigas de hormigón armado presentan una problemática crítica vinculada al punzonamiento, especialmente bajo condiciones de incendio. Este estudio desarrolla un análisis paramétrico para evaluar numéricamente la respuesta de losas sometidas a altas temperaturas, mediante un modelo 3D de Elementos Finitos en ABAQUS, utilizando el modelo constitutivo Concrete Damage Plasticity (CDP). Para ello, se analizan variaciones en factores clave como la temperatura y las propiedades termo-mecánicas del hormigón y del acero, en distintos escenarios térmicos. Los resultados numéricos evidencian la influencia de cada parámetro en la respuesta estructural, destacando su rol en el mecanismo de falla global en condiciones extremas.

Keywords: Reinforced Concrete, Punching, High Temperatures, Concrete Damage Plasticity, ABAQUS.

Abstract. Flat slab systems in reinforced concrete structures present a critical issue related to punching shear, particularly under fire conditions. This study conducts a parametric analysis to numerically assess the behavior of slabs exposed to high temperatures, using a 3D Finite Element model in ABAQUS and the Concrete Damage Plasticity (CDP) constitutive model. Key factors such as temperature and the thermo-mechanical properties of concrete and steel are varied across different thermal scenarios. The numerical results highlight the influence of each parameter on the structural response and their role in the global failure mechanism under extreme thermal conditions.

1. INTRODUCCIÓN

El punzonamiento constituye uno de los modos de falla más críticos en las losas sin vigas, debido a su carácter frágil y súbito, lo que lo convierte en un riesgo estructural de gran relevancia. Su ocurrencia está condicionada por factores como la trabazón de los agregados, la calidad del acero y la resistencia del hormigón. Bajo la acción de altas temperaturas, como las generadas en un incendio, la degradación térmica reduce significativamente la capacidad resistente. Un caso emblemático fue el colapso parcial del edificio Ronan Point, donde una explosión seguida de un incendio desencadenó una falla por punzonamiento (Viciosa, 2017).

Si bien diversos estudios experimentales han analizado este fenómeno a temperatura ambiente, como el trabajo de Adetifa y Polak (2005) con un modelo losa–columna a escala real, la investigación experimental bajo condiciones térmicas elevadas resulta todavía limitada (Smith et al., 2014). En contraste con esta escasez de ensayos, el campo numérico ha mostrado un mayor desarrollo, con modelos principalmente a temperatura ambiente (Le Thanh et al., 2022; Navarro et al., 2018) y, en menor medida, bajo altas temperaturas (Balarezo et al., 2024). Factores determinantes como la fluencia del acero, la resistencia del hormigón o parámetros térmicos vinculados al modelo de incendio, la transferencia de calor y la expansión térmica han sido escasamente explorados, pese a su relevancia en situaciones reales de exposición al fuego.

En este contexto, el presente estudio examina de manera sistemática la influencia de dichos factores mediante un modelo numérico tridimensional no lineal implementado en Abaqus (2014), basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF) y en el modelo constitutivo de Daño Plástico del Hormigón (CDP). La calibración se realizó a partir del ensayo experimental de Adetifa y Polak (2005), incorporando posteriormente la variación térmica de las propiedades mecánicas y un análisis de transferencia de calor. Se evalúan curvas carga–desplazamiento y la degradación de la resistencia al punzonamiento, identificando los parámetros más críticos. La principal contribución de este trabajo es presentar un análisis paramétrico detallado que profundiza en la comprensión del comportamiento estructural de las losas sin vigas sometidas simultáneamente a punzonamiento y a la acción de altas temperaturas.

2. MARCO EXPERIMENTAL DE REFERENCIA

Con el propósito de analizar el comportamiento frente al punzonamiento en losas de hormigón armado sin refuerzo a cortante, bajo condiciones de temperatura ambiente, se emplea como base de estudio el ensayo experimental de una losa a escala real documentado por Adetifa y Polak (2005). Las dimensiones de los elementos, expresadas en la Tabla 1 y en cuanto a las propiedades de los materiales, expresadas en la Tabla 2 se muestran, respectivamente.

Elemento	Lado 1 (mm)	Lado 2 (mm)	Altura (mm)
Columna	150	150	420
Losa	1800	1800	120

Tabla 1: Dimensiones del ensayo experimental de referencia (Adetifa y Polak, 2005).

Las Figuras 1 y 2 ilustran la configuración geométrica completa del conjunto estructural formado por la losa y la columna de hormigón armado, correspondiente al ensayo experimental reportado por Adetifa y Polak (2005). La losa de concreto armado fue diseñada con doble refuerzo en ambas caras: una malla de acero dispuesta en la parte superior, correspondiente a la zona de compresión, y otra malla de refuerzo colocada en la parte inferior, correspondiente a la zona de tracción. Ambas mallas estaban conformadas por barras de acero corrugado de 10 mm

de diámetro, distribuidas regularmente en las direcciones ortogonales x y z , garantizando así una adecuada resistencia bidireccional. La carga fue aplicada de manera axial sobre la columna central del sistema, empleando un actuador hidráulico que permitió controlar con precisión el desplazamiento vertical impuesto.

Material	Propiedad	Valor
Hormigón	Resistencia a compresión (f'_c)	44 MPa
Hormigón	Resistencia a tracción (f'_t)	2.2 MPa
Acero	Tensión de fluencia (f_y)	455 MPa

Tabla 2: Propiedades relevantes de los materiales utilizados en el ensayo experimental.

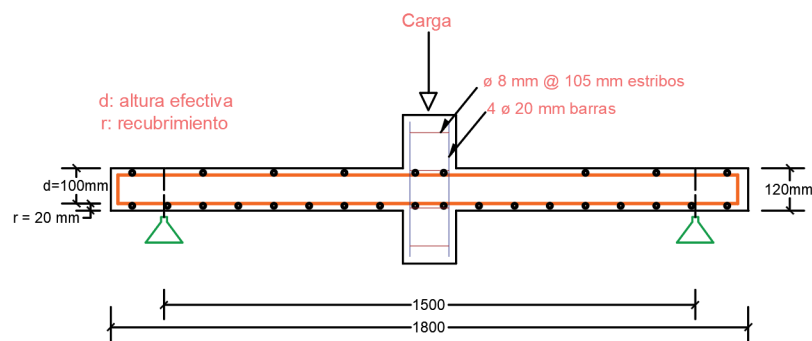


Figura 1: Vista transversal.

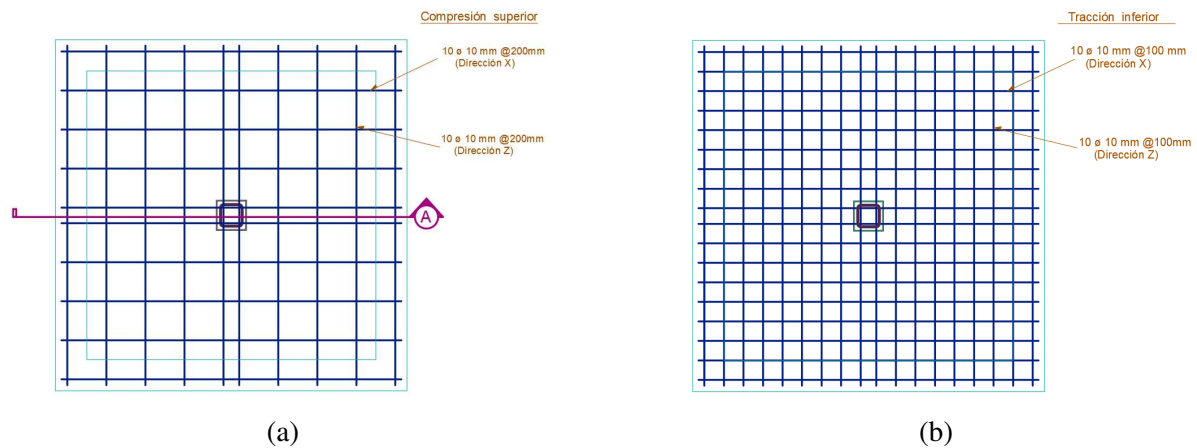


Figura 2: Vista en planta del armado de la losa: (a) cara superior y (b) cara inferior.

3. MODELACIÓN NUMÉRICA EN RÉGIMEN TÉRMICO ESTÁNDAR

Las expresiones desarrolladas por [Hafezolghorani et al. \(2017\)](#) fueron utilizadas con el objetivo de representar el daño mecánico en el hormigón, diferenciando entre el daño por compresión (d_c) y el daño por tracción (d_t). Estas formulaciones permiten caracterizar el deterioro

progresivo del material bajo solicitaciones mecánicas específicas. El modelo de Daño Plástico del Concreto (CDP) requiere como insumo fundamental las curvas tensión-deformación uniaxiales tanto a compresión como a tracción. Para la compresión, se adoptó una formulación dividida en tres regiones, siguiendo el enfoque propuesto por Krätzig y Pölling (2004), que permite capturar adecuadamente la respuesta no lineal del hormigón hasta su rotura. En el caso de la tracción, el comportamiento fue idealizado mediante dos regiones, también conforme a los lineamientos de dicha referencia. En cuanto al comportamiento del acero, se adoptó un modelo bilineal con respuesta rígido-plástica. Las propiedades materiales utilizadas en el modelo numérico para el ensayo a punzonamiento a temperatura ambiente fueron las siguientes: (1) hormigón, se emplearon un módulo de elasticidad $E = 44,000$ MPa, resistencia a compresión $f'_c = 44$ MPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$ y densidad $\rho = 2400$ kg/m³; y (2) acero, se utilizaron un módulo de elasticidad $E = 200,000$ MPa, tensión de fluencia $f_y = 455$ MPa, resistencia última $f_u = 650$ MPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$, densidad $\rho = 7850$ kg/m³, deformación de fluencia $\varepsilon_y = 0,023$ y deformación última $\varepsilon_t = 0,25$.

Para simular el ensayo de Adetifa y Polak (2005), se modeló un cuarto del sistema losa-columna, aprovechando su doble simetría. La Figura 3 muestra las condiciones de borde y la zona de aplicación de desplazamientos. Se emplearon elementos C3D8R para la losa de hormigón y T3D2 para las armaduras, asumiendo adherencia perfecta entre ambos materiales. El comportamiento no lineal del hormigón se representó mediante el modelo de plasticidad por daño de Abaqus (2014). La carga se aplicó como un desplazamiento impuesto en la columna, con un valor máximo de 20 mm.

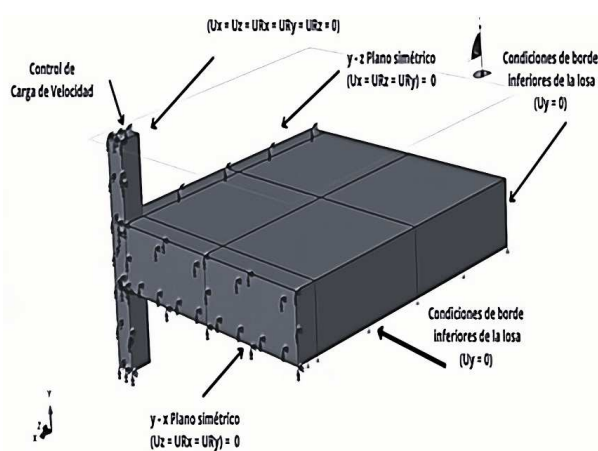


Figura 3: Geometría y condiciones de borde del modelo.

3.1. Correlación experimental-numérica del modelo a temperatura ambiente

Los parámetros empleados en el modelo constitutivo de plasticidad por daño (CDP) se detallan: la excentricidad de la superficie de fluencia está representada por $\varepsilon = 0,1$, mientras que $K_c = 0,667$ controla la forma de dicha superficie. La relación entre la resistencia equibiaxial inicial y la resistencia uniaxial a compresión del hormigón se expresa como $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} = 1,16$. Asimismo, se consideró un ángulo de dilatación de $\Psi = 30^\circ$ y una viscosidad numérica nula ($\mu = 0$). Los parámetros Ψ y μ fueron determinados a partir de un proceso de calibración numérica para representar adecuadamente el comportamiento no lineal del material, mientras que los otros parámetros fueron tomados de Navarro et al. (2018).

Se evaluaron distintos valores del parámetro de viscosidad μ , observándose que valores bajos aumentan el costo computacional, pero mejoran la precisión en simulaciones explícitas. Se adoptó un valor de $\mu = 0$ por su mejor desempeño en la representación numérica. La Figura 4a muestra la influencia del ángulo de dilatación en la curva carga-desplazamiento del modelo CDP. Ángulos menores reducen la capacidad resistente, mientras que mayores la incrementan. Se seleccionó un ángulo de 30° por su adecuada correspondencia con el pico de carga experimental reportado por Adetifa y Polak (2005). Finalmente, la Figura 4b compara la respuesta estructural con y sin la inclusión de los parámetros de daño. Su consideración permite capturar con mayor realismo la evolución del daño en el hormigón, mientras que su omisión puede inducir errores al estimar la capacidad estructural de la losa.



Figura 4: Estudio de sensibilidad: (a) el ángulo de dilatación y (b) efecto del daño.

Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad cuantitativo con discretizaciones de malla de 40, 24, 20 y 15 mm. La malla de 40 mm fue descartada, ya que por debajo del mínimo recomendado de 4 capas para evitar efectos de hourglassing (Sun, 2006). Además, se consideró que el tamaño de los elementos debe ser mayor que el del agregado grueso (10 mm). La Figura 5 compara las cargas últimas de punzonamiento obtenidas numéricamente con distintas mallas, normativas internacionales (ACI (2019), CEN (2004), CSA (2004), fib (2013)), modelos teóricos (Muttoni (2008)) y experimentales (Adetifa y Polak (2005)). Los valores numéricos obtenidos fueron 181, 202, 206 y 219 kN, en función de la malla. Asimismo, se comparan con estudios numéricos: Le Thanh et al. (2022) (243 kN), Rasoul y Taher (2019) (292 kN), Navarro et al. (2018) (237 kN), Genikomsou y Polak (2016) (274 kN) y (2017) (234 kN). Para un análisis detallado del patrón de fisuras, véase Balarezo et al. (2024).

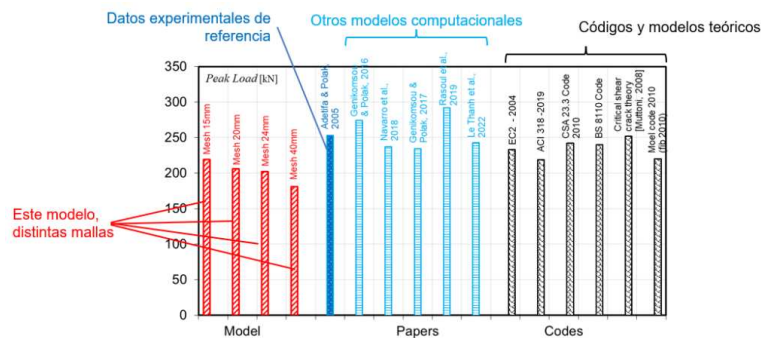


Figura 5: Comparación de la carga ultima de punzonamiento (kN).

3.2. Análisis paramétrico del punzonamiento en condiciones térmicas normales

Las normativas de diseño para punzonamiento, como CEN (2004), ABNT (2012), ACI (2019) y CSA (2004), consideran la resistencia a compresión del hormigón (f_c) como un parámetro fundamental, debido a su influencia directa en la capacidad de carga ante este tipo de falla. En este contexto, se evaluó el efecto de la reducción de f_c sobre la curva carga-desplazamiento. Para la calibración del modelo numérico, se tomó un valor inicial de $f_c = 44$ MPa. La Figura 6a presenta los resultados obtenidos con valores reducidos de f_c (31.5, 27.5 y 16.5 MPa), comparados con los del ensayo experimental de Adetifa y Polak (2005). Se observa que la disminución de f_c reduce significativamente la capacidad por punzonamiento, lo que concuerda con la disminución de la resistencia al corte del hormigón.

De forma complementaria, se analizó la influencia del límite de fluencia del acero (f_y) en la capacidad estructural frente al punzonamiento. La Figura 6b muestra que un incremento en f_y conduce a una mayor capacidad resistente, lo cual es coherente con el aumento de la resistencia a corte del refuerzo. Este enfoque es respaldado por la Teoría de la Fisura Crítica propuesta por Muttoni (2008), donde f_y se considera un parámetro clave por su vinculación directa con el comportamiento frente al punzonamiento. En el ensayo de Adetifa y Polak (2005), el valor de f_y fue de 455 MPa. Para el análisis paramétrico, se consideraron distintos valores de f_y , junto con sus respectivas deformaciones unitarias de fluencia (ε_y), resistencias a tracción (f_t) y deformaciones unitarias a tracción (ε_t), los cuales se detallan en la Tabla 3.

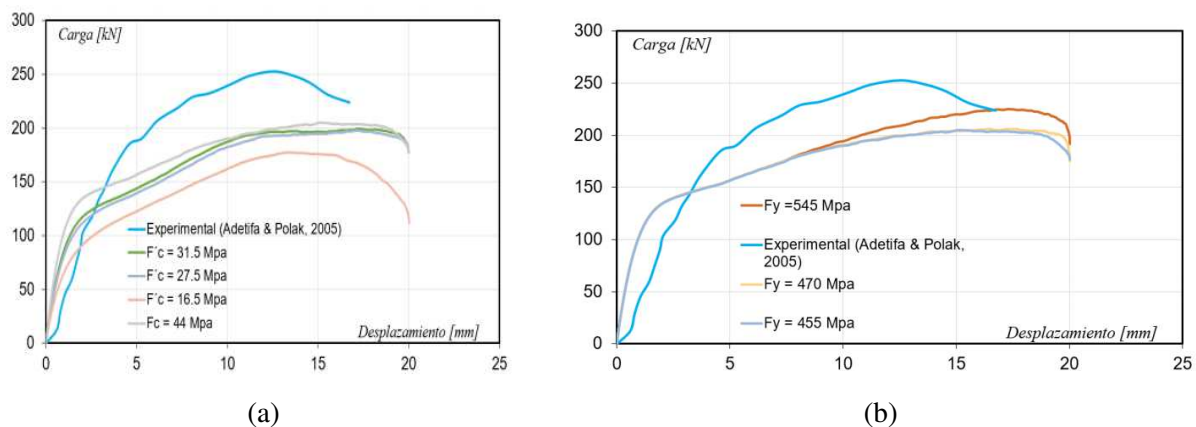


Figura 6: Comparación de la carga última de punzonamiento (kN) obtenida mediante (a) resistencia a compresión del hormigón (f_c) y (b) límite de fluencia del acero (f_y).

f_y [MPa]	ε_y [-]	f_t [MPa]	ε_t [-]
455	0.0023	650	0.25
470	0.0024	650	0.20
545	0.0027	900	0.10

Tabla 3: Parámetros mecánicos del acero utilizados en el análisis paramétrico.

4. MODELADO NUMÉRICO EN CONDICIONES TÉRMICAS ATÍPICAS

En esta sección se adapta el modelo material previamente calibrado a temperatura ambiente con el fin de simular la respuesta al punzonamiento del conjunto losa-columna expuesto a condiciones térmicas elevadas. Para el análisis de transferencia de calor, se emplearon elementos finitos tipo DC3D8 para el hormigón y tipo DC1D2 para las armaduras de acero. El escenario térmico fue generado mediante la aplicación de un flujo de calor en la cara superior de la losa durante un período de 60 minutos, siguiendo la curva de incendio estándar ISO 834.

En el modelo térmico se consideró una emisividad del aire $\varepsilon = 0,8$, el valor del coeficiente de Stefan–Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, así como un coeficiente de convección superficial de $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ en la cara expuesta al fuego y de $9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ en la cara opuesta. Las propiedades térmicas del hormigón y del acero, incluyendo capacidad calorífica, conductividad térmica y coeficiente de dilatación, se definieron como dependientes de la temperatura, conforme a las recomendaciones del Eurocódigo 2 (CEN, 2004). Posteriormente, el perfil térmico obtenido se importó en el modelo mecánico previamente calibrado a temperatura ambiente.

La Figura 7a presenta la validación del modelo 2, cuyos resultados se comparan con los del ensayo experimental de Adetifa y Polak (2005) y con el modelo constitutivo 1 a temperatura ambiente. Este último combina la formulación de Krätzig y Pölling (2004) para el hormigón con el modelo tridimensional CDP y un modelo bilineal para el acero. Se presentó la validación 2 que emplea la formulación constitutiva de CEN (2004), cuyos resultados se comparan con los del ensayo experimental de Adetifa y Polak (2005) y con el modelo constitutivo 1.

Ambos modelos fueron evaluados a temperatura ambiente utilizando una discretización de malla de 20 mm. El modelo constitutivo 2 mostró una excelente correlación con los resultados experimentales, superando ligeramente al modelo constitutivo 1 en precisión: presentó una mejora del 1 % en la capacidad de punzonamiento, aunque con una disminución del 10.8 % en la deflexión. Estos resultados respaldan la consistencia del modelo constitutivo 2 bajo condiciones normales, lo que justifica su elección para el análisis en condiciones térmicas, dada su adecuada calibración y capacidad predictiva. Finalmente, en la Figura 7b se muestran los resultados computacionales obtenidos en términos de curvas carga vs. desplazamiento para el ensayo de punzonamiento en función de la temperatura del modelo constitutivo 2. Puede observarse una pérdida de capacidad portante de alrededor del 25 % en el modelo a alta temperatura, respecto al modelo a temperatura ambiente. Para un análisis detallado del patrón de fisuras a temperatura atípica, véase Balarezo et al. (2024).

4.1. Análisis paramétrico del punzonamiento en condiciones térmicas atípicas

Los trabajos experimentales de Smith et al. (2014), entre otros, reportan temperaturas superficiales máximas del orden de 480°C , limitadas por las capacidades del equipo de calentamiento. Estas temperaturas resultan considerablemente inferiores a las que se alcanzarían en incendios reales. Por ello, en este estudio se simula numéricamente el comportamiento mecánico de losas de hormigón sometidas a temperaturas elevadas, considerando distintos escenarios de calentamiento mediante modelos de incendio. La Figura 8a presenta el perfil térmico del ISO 864 de los perfiles térmicos obtenidos para los modelos ASTM, curva de fuego externa y curva modificada para hidrocarburos según el Eurocódigo. Se observó que el modelo de fuego externo genera la menor temperatura final en la losa. A partir de estos perfiles, se realiza el análisis estructural. La Figura 8b muestra las curvas de capacidad a punzonamiento para cada modelo de incendio, con valores pico de 154 kN (ISO 834), 131 kN (Eurocódigo modificado) y 115 kN (ASTM), y deflexiones correspondientes de 10.0 mm, 8.1 mm y 4.8 mm. Se concluye que el

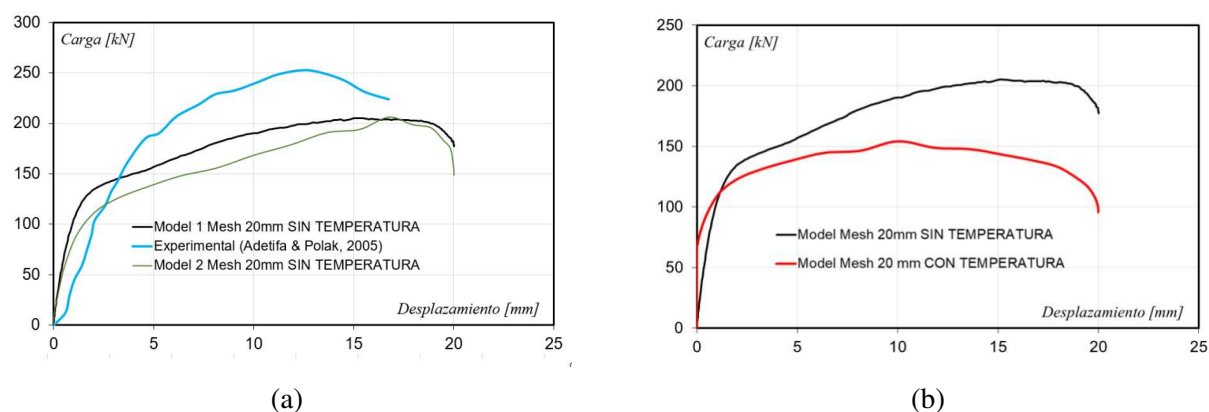


Figura 7: Modelos numéricos: (a) compresión para el hormigón vs modelo experimental y (b) curva capacidad para el modelo a temperatura diferentes temperaturas.

modelo ASTM induce una falla más rápida, asociada a un mayor deterioro térmico.

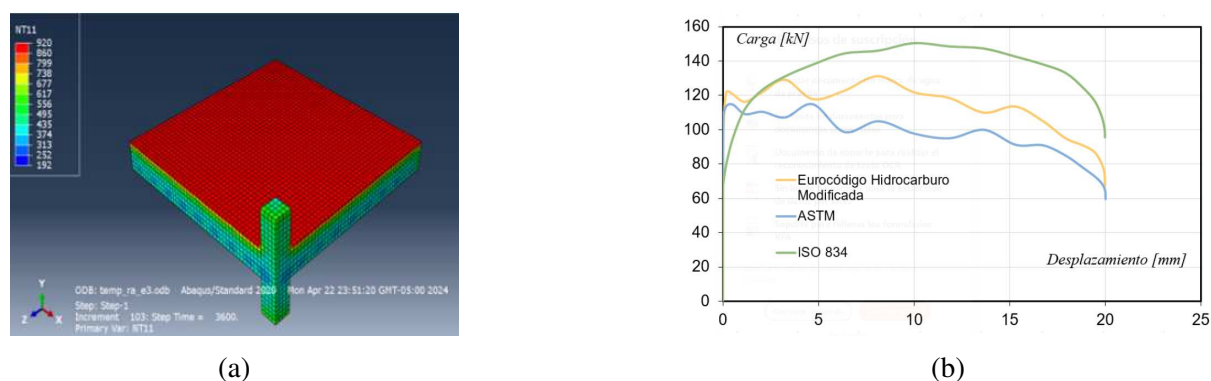


Figura 8: (a) Perfil térmico obtenido con el modelo de incendio ISO 834 y (b) curva de capacidad para diferentes modelos de incendio.

En este análisis de sensibilidad se analizó numéricamente el comportamiento térmico y estructural de losas de hormigón sometidas a altas temperaturas, considerando distintos valores de emisividad (ϵ), conductividad térmica (h) y coeficiente de expansión térmica (CET). A partir de los perfiles térmicos obtenidos, se evaluó la capacidad a punzonamiento bajo cada condición. Se estudian los perfiles térmicos para: (a) PT I con $\epsilon = 0,6$ y $h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, y (b) PT II con $\epsilon = 0,8$ y la misma conductividad. Como es de esperarse, un mayor valor de emisividad produce una mayor temperatura en el perfil térmico de la losa. Se estudian otros perfiles térmicos para: (a) PT III con $\epsilon = 0,8$ y $h = 9 \text{ W/m}^2\text{K}$, y (b) PT IV con $\epsilon = 0,8$ y $h = 7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Se observa que una mayor conductividad genera temperaturas finales más elevadas en la losa.

Finalmente, en la Figura 9a se muestran las curvas de capacidad estructural a punzonamiento asociadas a los perfiles PT III y PT IV. Los resultados indican que una mayor conductividad térmica se traduce en una menor capacidad estructural, debido a una mayor degradación térmica del material. En la Figura 9b, se evalúa el efecto del coeficiente de expansión térmica (CET) del hormigón, considerando dos escenarios: uno con CET constante y otro dependiente de la temperatura. Se observa que el caso con CET constante presenta una menor capacidad estructural, lo cual se explica por una mayor degradación de la adherencia.

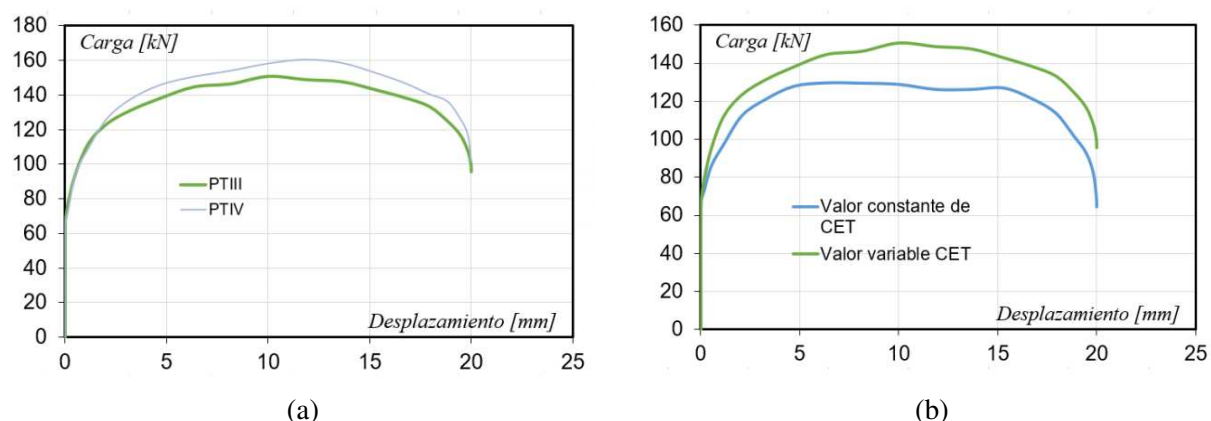


Figura 9: Curva de capacidad: (a) conductividad térmica y (b) coeficiente de expansión térmica.

5. CONCLUSIONES

El modelo numérico propuesto reproduce de manera adecuada la resistencia al punzonamiento a temperatura ambiente, validando su aplicabilidad en escenarios térmicos más exigentes, según la comparación con los resultados de [Adetifa y Polak \(2005\)](#).

La resistencia a compresión del hormigón y el límite de fluencia del acero son parámetros decisivos: un mayor límite de fluencia incrementa la resistencia, mientras que una reducción en la resistencia del hormigón la disminuye significativamente, en concordancia con lo reportado por [Navarro et al. \(2018\)](#).

La emisividad (ε) y la conductividad térmica (h) influyen directamente en la respuesta estructural: valores elevados aumentan las temperaturas en la losa y reducen la capacidad resistente, mientras que valores menores favorecen un mejor desempeño.

El coeficiente de expansión térmica (CET) también es determinante: su reducción compromete la adherencia entre hormigón y acero, disminuyendo la capacidad estructural global.

Los códigos de diseño CEN (2004), ACI (2019), CSA 23.3 (2004) y ABNT (2012) se sustentan en formulaciones empíricas o semiempíricas válidas únicamente a temperatura ambiente. En contraste, el modelo de Muttoni (2008), basado en la teoría de la fisura crítica, introduce un enfoque mecánico que permite una predicción más fundamentada. Dicho modelo estimó la capacidad de punzonamiento con notable precisión (252 kN), prácticamente idéntica al valor experimental de 253 kN. Por su parte, la norma ACI 318 también mostró una predicción adecuada (219 kN), comparable a la obtenida mediante simulación numérica con una discretización de malla de 15 mm, lo que refuerza su validez en el análisis estructural.

De manera integral, el análisis paramétrico desarrollado permite comprender con mayor profundidad la interacción entre punzonamiento y altas temperaturas, y ofrece un marco metodológico útil tanto para la práctica profesional como para el desarrollo de futuras normas de diseño estructural.

REFERENCIAS

- Abaqus D.S.S.C. *Abaqus Analysis User's Manual Version 6.14*. 2014.
- ABNT. *NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio - Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brazil, 2012. ISBN 978-85-07-03373-8.
- ACI Committee 318. *ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019. ISBN 978-1-64195-

- 056-5. doi:10.14359/51716937.
- Adetifa B. y Polak M.A. Retrofit of slab column interior connections using shear bolts. *ACI Structural Journal*, 102(2):268–274, 2005. doi:10.14359/14278.
- Balarezo I., Folino P., Ripani M., y Ludzik H. Modelación computacional del punzonamiento en losas de hormigón armado sometidas a altas temperaturas. *Mecánica Computacional*, 41(2):67–76, 2024. doi:10.70567/mc.v41i2.7.
- CEN. *EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004. ISBN 978-0-580-83726-5. Standard providing general rules for concrete structures design.
- CSA 23.3 Committee. *Design of Concrete Structures (CSA A23.3-04)*. CSA Standard A23.3-04, Canada, 2004. doi:10.1353/book15529. Standard for the design of concrete structures in Canada.
- fib. *Model Code for Concrete Structures 2010*. International Federation for Structural Concrete (fib), Ernst & Sohn, Wiley, Lausanne, Switzerland, 2013. ISBN 978-3-433-03061-5. doi: 10.1002/9783433604090. Model code providing design guidelines for concrete structures.
- Genikomsou A.S. y Polak M.A. Finite element analysis of reinforced concrete slabs with punching shear reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, 142(12), 2016. doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001603.
- Genikomsou A.S. y Polak M.A. 3d finite element investigation of the compressive membrane action effect in reinforced concrete flat slabs. *Engineering Structures*, 136:233–244, 2017. doi:10.1016/j.engstruct.2017.01.024.
- 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. doi: 10.2749/101686616X1081.
- 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. doi:10.1016/j.compstruc.2004.03.002.
- 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. doi:10.3221/IGF-ESIS.59.17.
- Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI Structural Journal*, 105(4):440–450, 2008. doi:10.14359/19858.
- Navarro M., Ivorra S., y Varona F.B. Parametric computational analysis for punching shear in rc slabs. *Engineering Structures*, 165:254–263, 2018. doi:10.1016/j.engstruct.2018.03.035.
- Rasoul Z.M.R.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. doi:10.21533/pen.v7i4.943.
- Smith H.K.M., Stratford T.J., y Bisby L.A. Punching shear of restrained reinforced concrete slabs under fire conditions. En *Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire (SiF 2014)*. Shanghai, China, 2014. Web ID: 15533789.
- Sun E.Q. Shear locking and hourglassing in msc nastran, abaqus, and ansys. En *MSC Software Users Meeting*, páginas 1–9. 2006. Conference paper; no DOI available.
- Viciosa M. Grenfell y ronan point: medio siglo de catástrofes en las alturas de londres. <http://www.elindependiente.com/futuro/2017/06/17/grenfell-y-ronan-point-medio-siglo-de-catastrofes-en-las-alturas-de-londres/>, 2017. Online; accessed 14 May 2024.