

Estudio a corte y punzonado en vigas y losas de hormigón reforzado con fibras, implementando análisis no lineal y modelo de daño y su contribución en el diseño de losas casetonadas

Y. Giupponi^{a*}, C. Razetto^a, R. Zerbino^b, A. Conforti^c, E. Cuenca^d y V. Rougier^a

^aGrupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras (GIMCE), UTN-Facultad Regional Concepción del Uruguay, CP E3264, Concepción del Uruguay, Argentina, giupponiy@frcu.utn.edu.ar, razettoc@frcu.utn.edu.ar, rougierv@frcu.utn.edu.ar

^bConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT-CIC), CP 1900, La Plata, Argentina, zerbino@ing.unlp.edu.ar

^cDepartment of Civil, Environmental, Architectural Engineering and Mathematics (DICATAM), University of Brescia, CP 25121, Brescia, Italia, antonio.conforti@unibs.it

^dDepartment of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, CP 20133, Milan, Italia, estefania.cuenca@polimit.it

Recibido: 31 de mayo de 2025

Aceptado: 9 de septiembre de 2025

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo analizar el comportamiento mecánico del hormigón armado reforzado con fibras, en cuanto a su desempeño al corte y punzonado en losas casetonadas. A partir de los datos experimentales de caracterización de una serie de hormigones reforzados con fibras de acero se realizaron modelos numéricos utilizando el software ABAQUS® mediante el método de elementos finitos no lineales aplicando un modelo de daño (Concrete Damaged Plasticity). Estos modelos permiten comparar sus desempeños y predecir la resistencia al corte, a punzonado y visualizar el efecto del uso combinado de armaduras convencionales y hormigón con fibras de acero.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, corte, punzonado, fibras, casetonados, simulación numérica

ABSTRACT

This work aims to analyze the mechanical behavior of fiber-reinforced concrete, focusing on its performance under shear and punching in ribbed slabs. Based on experimental data characterizing a series of steel fiber-reinforced concretes, numerical models were created using ABAQUS® software through the nonlinear finite element method applying a damage model (Concrete Damaged Plasticity). These models allow for the comparison of their performances and the prediction of shear and punching resistance, as well as visualization of the effect of incorporating steel fibers.

KEYWORDS: Concrete, shear, punching, fibers, waffle slabs, numerical simulation

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Giupponi, Y., Razetto, C., Zerbino, R., Conforti, A., Cuenca, E., y Rougier, V. (2026). Estudio a corte y punzonado en vigas y losas de hormigón reforzado con fibras, implementando análisis no lineal y modelo de daño y su contribución en el diseño de losas casetonadas. *Revista Hormigón*, 69, en prensa. <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/ze5vmg1wz>

1. Introducción

Los sistemas estructurales con entrepisos de hormigón sin vigas brindan importantes ventajas en las edificaciones (aberturas de piso a cielorraso, divisiones internas independientes de la estructura, flexibilidad en ubicación de instalaciones, etc.) y son muy utilizados en proyectos de edificios de oficinas, plantas industriales y estacionamientos [1]. Dentro de estos sistemas, se encuentran los alivianados bidireccionales o reticulares (casetonados), los cuales se utilizan principalmente debido a su facilidad de construcción y atractivo estético dando lugar a edificios más económicos y ornamentalmente más sólidos [2].

En estos sistemas estructurales casetonados, las losas de hormigón están constituidas por una capa de compresión y por una retícula de nervios que resisten flexión y corte principalmente. Asimismo, estos sistemas estructurales apoyan directamente sobre las columnas por intermedio de macizos de hormigón y, por lo tanto, presentan la particularidad de colapsar por punzonamiento. El corte y el punzonado son mecanismos de falla frágil que ocurren con una importante reducción de capacidad portante y sin manifestación previa de peligro, resultando así de muy alto riesgo [1].

Una alternativa para superar estos inconvenientes es agregar fibras que aporten capacidad residual al hormigón, las que suelen ser de acero, pero también podrían ser de vidrio o polímero [3,4].

Las fibras de acero pueden eliminar estribos para el refuerzo al corte y reducir la congestión del refuerzo simplificando los detalles constructivos. Además, aumentan la resistencia a corte al proporcionar resistencia a la tracción después de fisuradas las superficies diagonales de la fisura y al controlar el espaciado y el ancho de estas. [5,6].

Por otro lado, en estudios sobre losas o placas de hormigones sin fibras o reforzados con fibras de acero, se ha observado que la resistencia a punzonado de una unión losa-columna varía cuando el mecanismo de aplicación de la carga simula una tipología

puntual (como en aparatos de ensayo convencionales), comparado con un mecanismo de carga uniformemente repartida; un escenario más realista logrado utilizando un aparato de ensayo innovador [2].

En cuanto a normativas o reglamentos a nivel internacional, el *fib Model Code 2010* [7] indica requerimientos mínimos de diseño tanto para hormigones convencionales como reforzados con fibras de acero.

En las últimas décadas se han desarrollado diversos modelos para simular el comportamiento del hormigón reforzado con fibras (HRF) [7,8]. Los modelos se pueden clasificar en macro-modelos y meso-modelos según la escala en la que están definidos y también en modelos multiescala. En los macro-modelos se representa al material compuesto como un único material con propiedades promedio mientras que en los meso-modelos se tiene en cuenta cada componente material, o sea, la matriz de hormigón, las fibras y en muchos casos la interfaz. Los modelos multiescala resuelven simultáneamente el problema en diferentes escalas [8].

Estos diferentes enfoques pueden implementarse en programas computacionales de elementos finitos de código abierto, pero también es posible usar programas comerciales de elementos finitos multipropósito que tienen incorporadas características que hacen posible modelar un HRF [9-11].

Este estudio emplea modelos numéricos a través del software de cálculo ABAQUS® para analizar el comportamiento mecánico de vigas y paños de losas de hormigón armado, tanto convencional como reforzado con fibras. Estos elementos estructurales constituyen componentes fundamentales de los sistemas de losas casetonadas. Las vigas se someten a carga en los tercios de su longitud, con apoyos en los extremos, mientras que los paños de las losas reciben carga en el centro y están apoyados a lo largo de todo su perímetro. Para la calibración de los modelos, se elaboraron hormigones con agregados de peso normal, con y sin refuerzo de fibras de acero, que fueron caracterizados mediante ensayos de

flexión y compresión. Este trabajo forma parte de un proyecto más amplio, dentro del cual se llevará a cabo una comparación experimental.

2. Materiales y métodos

2.1 Dosificación del hormigón y características de las fibras utilizadas

Se elaboraron hormigones incorporando 40 kg/m³ y 60 kg/m³ de fibras de acero Ferrofiber®AR65 (Figura 1) (HRF40 y HRF60). Se utilizaron como materiales cemento CPC 40, piedra partida granítica 6/12 mm, arena natural combinada con arena de trituración para obtener un módulo de finura del orden de 2,5 y una dosis adecuada de un aditivo reductor de agua.



Figura 1. Fibras empleadas.

2.2 Caracterización de material

Con cada mezcla se moldearon cuatro cilindros de 100 mm x 200 mm para ensayos de compresión y cuatro prismas de 150 mm x 150 mm x 600 mm para ensayos de flexión, que fueron desmoldados a las 24 horas y curados en cámara húmeda (23 °C ± 2 °C y 95 % ± 5 % HR) hasta la edad de 28 días.

Los ensayos a compresión se realizaron en base a la Norma IRAM 1546 [12]. Los ensayos a flexión se realizaron siguiendo la norma EN 14651 [13] para lo cual se aserró en el centro de la cara traccionada de las probetas una entalladura de 25 mm, sobre la cual se fija un transductor tipo clip-gage para medir la abertura de la boca de fisura (CMOD). La luz entre apoyos simples fue de 500 mm y se aplicó una carga en el centro de la luz conforme muestra la Figura 2.

La Tabla 1 muestra los valores promedio y coeficientes de variación de los resultados de resistencia (f'_{cm}) y del módulo de elasticidad (E_c) obtenidos en ensayos de compresión y de la tensión de primera fisura (f_L) y de las tensiones residuales (f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} , f_{R4}) calculadas a partir los ensayos de flexión.

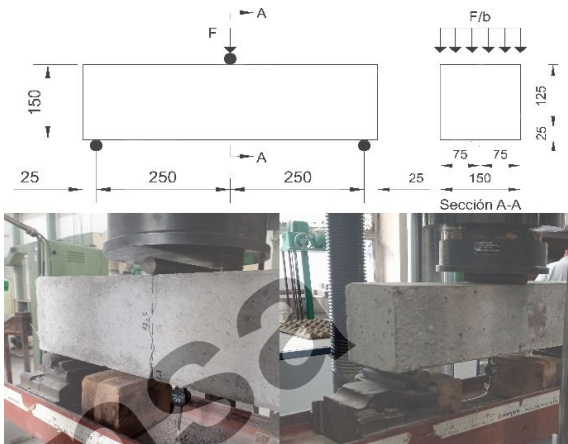


Figura 2. Ensayo de flexión sobre vigas entalladas (EN 14651 [12]).

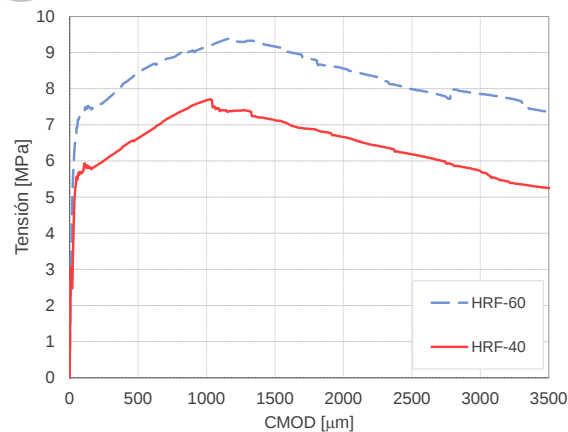


Figura 3. Curvas tensión-apertura de entalla (CMOD).

Tabla 1. Caracterización estática de los HRF. Coeficientes de variación entre paréntesis. H°: hormigón.

H°	f'_{cm} (MPa)	E_c (GPa)	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
HRF40	56,0 (2%)	35,1 (1%)	5,57 (1%)	6,63 (3%)	7,13 (9%)	6,19 (18%)	5,25 (21%)
HRF60	59,8 (1%)	36,3 (1%)	6,92 (1%)	8,44 (1%)	9,17 (2%)	7,99 (5%)	7,33 (3%)

2.3 Modelación numérica

2.3.1 Vigas

Para estudiar el desempeño mecánico de las vigas de HRF se modelaron cuatro prototipos de dimensiones 9 cm de ancho x 170 cm de canto y 1100 cm de largo, con una altura útil $d = 16$ cm. Se simularon vigas apoyadas en sus extremos sin restricciones y cargadas por medio de placas en los tercios de la luz de:

- hormigón armado sin refuerzo a corte (VHA);
- hormigón armado con refuerzo a corte y separación de estribos $d/2$ (VHAC2) con cuantía $70,5 \text{ cm}^2/\text{m}$;
- hormigón armado con refuerzo a corte y separación de estribos $d/4$ (VHAC4), con cuantía $141 \text{ cm}^2/\text{m}$;
- hormigón armado sin refuerzo a corte y fibras de acero $40 \text{ kg}/\text{m}^3$ (VHAF40),
- hormigón armado sin refuerzo a corte y fibras de acero $60 \text{ kg}/\text{m}^3$ (VHAF60).

La armadura se conformó por $2\varnothing 16$ mm inferior, por $2\varnothing 10$ mm superior y 5 estribos de $\varnothing 4,2$ mm constructivo y la armadura de refuerzo a corte en los extremos con estribos de $\varnothing 6$ mm $c/8$ cm ($d/2$) y $\varnothing 6$ mm $c/4$ cm ($d/4$).

El modelo de elementos finitos (EF) se realizó con simetría y una malla de 12,5 mm, utilizando el elemento tipo 8-nodos linear bricks C3D8R para los elementos de placa de carga y viga, y el elemento tipo 2 nodos lineales 3-D truss T3D2 para las armaduras de acero, las cuales se consideraron totalmente embebidas en el hormigón con un mallado de 12,5 mm (Figura 4).

A partir de valores medios determinados en los ensayos de caracterización de los hormigones se modeló el material combinado o reforzado con fibras utilizando curvas constitutivas adoptadas por diferentes autores. Para simular la carga se aplicó en los tercios de la luz de la viga un desplazamiento de 15 mm en un período de 5 segundos de forma gradual.

Para poder resolver el problema, se realizó un análisis dinámico (Dynamic, Explícito) para obtener patrones de daños y curvas carga-desplazamiento, entre otras cuestiones.

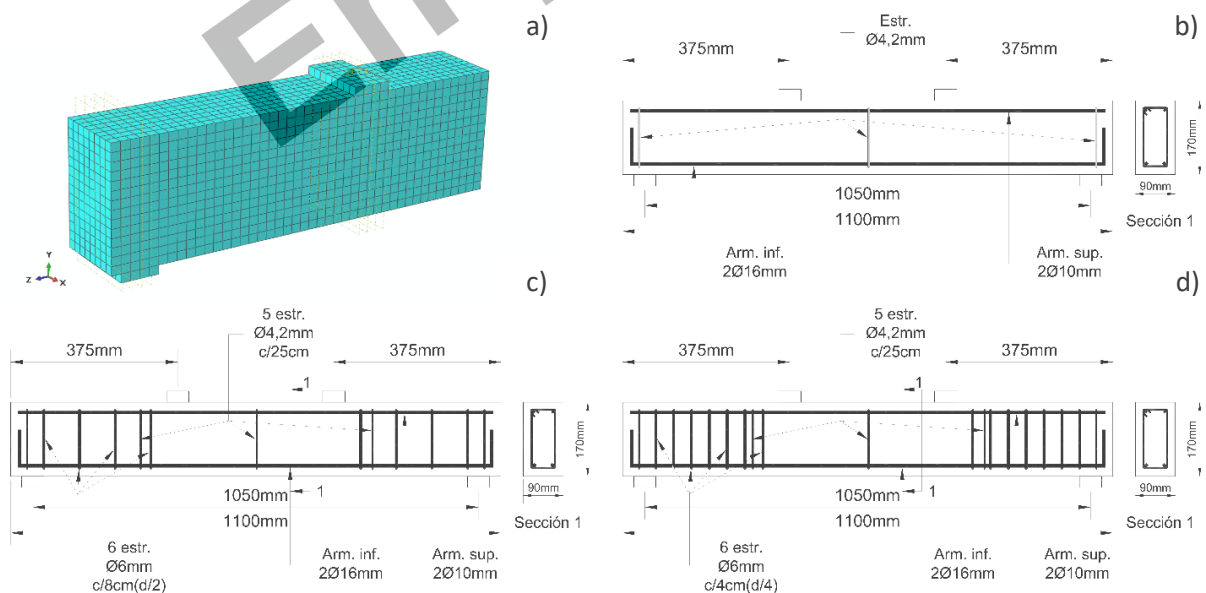


Figura 4. Modelo en perspectiva y prototipos: a) Módulo de mallado EF con simetría; b) sin armadura a corte; c) con armadura a corte $d/2$; d) con armadura de corte $d/4$.

2.3.2 Losas

Se simularon cuatro prototipos de losas de dimensiones 0,7 m x 0,7 m x 0,08 m, a saber:

- hormigón armado sin refuerzo a punzonado (LHAS),
- hormigón armado con refuerzo a punzonado (LHAP),
- hormigón armado sin refuerzo a punzonado con fibras de acero 40 kg/m³ (LHASF40), y
- hormigón armado sin refuerzo a punzonado con fibras de acero 60 kg/m³ (LHASF60).

La armadura inferior de acero ADN 420 (420 MPa), estuvo conformada por una malla de 9Ø 8 mm c/8 cm en ambas direcciones, y la armadura de refuerzo a punzonado 4Ø 8 mm en ambas direcciones (Figuras 5c y 5d). Se consideraron como condiciones de borde losas

apoyadas en todo su perímetro con una carga gradual en el centro de la placa simulada por un desplazamiento.

El modelo numérico se realizó con simetría (Figuras 5a y 5b), se utilizaron el elemento tipo C3D8R con un mallado de 12,5 mm para los elementos de placa de carga y losa; y el elemento tipo T3D2 con un mallado de 12,5 mm para las armaduras de malla y refuerzo a punzonado. Estas últimas se consideraron totalmente embebidas en el hormigón.

Se estimó un valor de 50 MPa para la resistencia a compresión del hormigón sin fibra Tomando como hipótesis que la resistencia a compresión del hormigón sin fibras resulta entre un 10 % y un 15 % menor que el HRF. Este último valor se calculó a partir de los resultados obtenidos de las resistencias de los HRF. Se aplicó un desplazamiento central de 25 mm en un período de 5 segundos con una

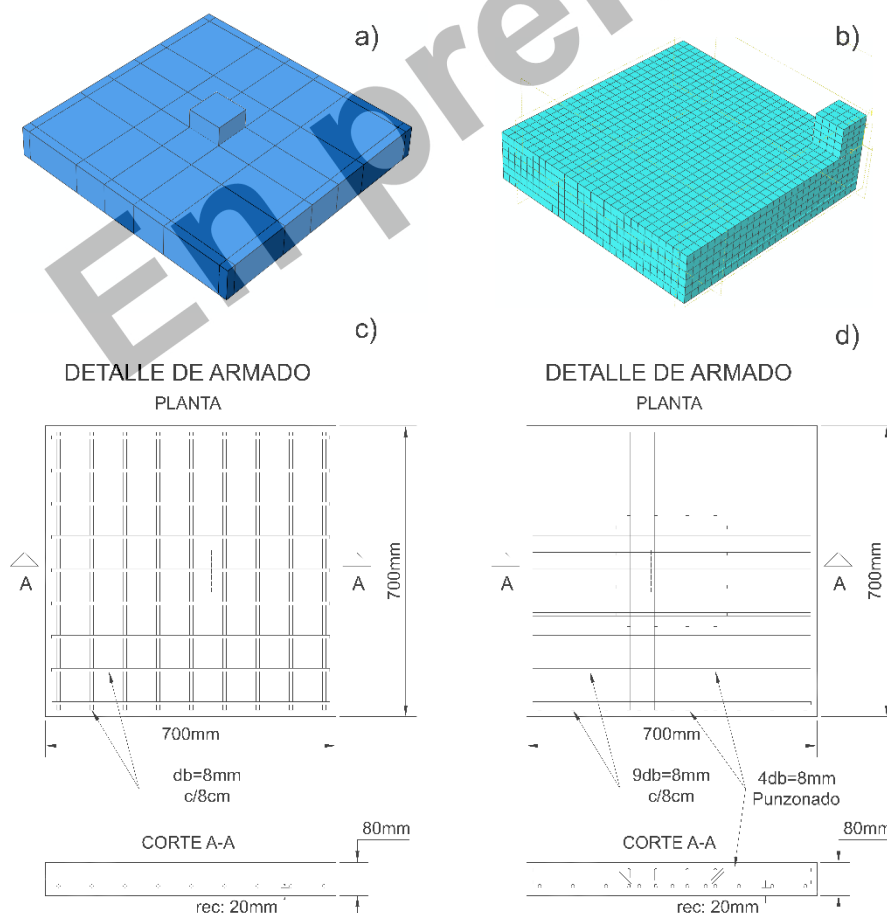


Figura 5. Prototipos: a) Modelo ABAQUS© Assembly; b) Mallado de EF con simetría; c) armadura sin refuerzo a punzonado; d) armadura con refuerzo a punzonado.

frecuencia de 0,25. Se resolvió el problema mediante un análisis dinámico (Dynamic, Explicit) por lo cual se definieron las propiedades de densidad de acero y hormigón.

2.4 Ecuaciones constitutivas

Para considerar el comportamiento real del hormigón, incluyendo el daño de fisuración por tracción y aplastamiento por compresión, se utilizó el modelo de daño (Concrete Damage Plasticity) de ABAQUS®. Los parámetros requeridos por el modelo son el ángulo de dilatancia ($\psi = 40$ en vigas y $\psi = 35$ en losas), la excentricidad $K = 0,1$; la relación entre la resistencia a compresión biaxial y la resistencia a la compresión uniaxial $f_{bo}/f_{bc} = 1,16$; factor $K = 0,1$ y viscosidad $= 0$; siendo estos valores adoptados de diferentes autores [14-16].

Para el comportamiento uniaxial a compresión de los hormigones (Figura 6a), se utilizó el modelo constitutivo propuesto por Kent and Park [14]. Para el comportamiento uniaxial a tracción del hormigón simple (Figura 6b), se utilizó el modelo constitutivo propuesto por Allam et al. [15] y para el comportamiento uniaxial de los HRF se implementó el modelo constitutivo indicado en la instrucción española EHE 2008 [16]. Las curvas de tensión deformación de los HRF se confeccionaron a partir de los valores medios obtenidos de los

ensayos de caracterización indicados en la Tabla 1. Para el hormigón sin fibras, las curvas de tensión deformación se elaboraron considerando la resistencia a compresión estimada en 50 MPa y la resistencia a tracción $f_t^* = 0,625 \cdot \sqrt{f_c^*} = 4,42$ MPa, calculada según lo indicado en el Reglamento CIRSOC 201-2005 [17].

Las curvas a compresión uniaxial indicadas en la Figura 6a resultan del tipo parabólico-lineal gobernada por la Ecuación (1) hasta la tensión máxima de compresión ($f'_c m$) con una deformación $\varepsilon'_c = 0,002$ seguidas por tramos lineales con coordenadas $f_c = 0,5 f'_c m$; $\varepsilon_c = 0,005$ y $f_c = 0,2 f'_c m$; $\varepsilon_c = 0,008$.

$$f_c = \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] f'_c m \quad (1)$$

Las curvas a tracción uniaxial indicadas en la Figura 6b del hormigón simple consideran un primer tramo lineal hasta el valor máximo de tracción f_t^* con una deformación $\varepsilon'_t = f_t^*/E_c$ y luego tramos lineales con coordenadas $f_t = 2/3 f_t^*$; $\varepsilon_t = 3 \varepsilon'_t$, $f_t = 3/8 f_t^*$; $\varepsilon_t = 5,875 \varepsilon'_t$, $f_t = 1/6 f_t^*$; $\varepsilon_t = 10,5 \varepsilon'_t$ y $f_t = 0$; $\varepsilon_t = 16 \varepsilon'_t$. Para el HRF consideran un primer tramo lineal hasta el valor máximo de tracción $f_t^* = 0,6 f_L$ con una deformación $\varepsilon'_t = f_t^*/E_c$, y luego tramos lineales con coordenadas $f_t = 0,45 f_{R1}$; $\varepsilon_t = 0,001 + 0,6 f_L/E_c$, $f_t = 0,5 f_{R3} - 0,2 f_{R1}$; $\varepsilon_t = 0,004$ y $f_t = \text{lineal}$; $\varepsilon_t = 0,020$.

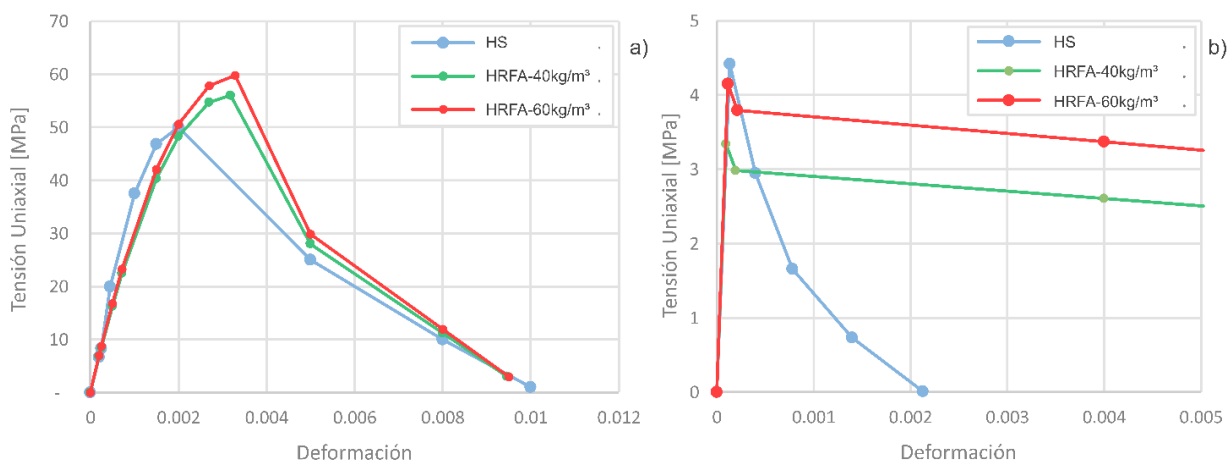


Figura 6. Curva de tensión-deformación adoptada en el modelo CDP: a) compresión uniaxial; b) tracción uniaxial.

3. Resultados y discusión

3.1 Daño a tracción y patrón de fisuras

La Figura 7 ilustra los patrones de daño por tracción (DAMAGET en ABAQUS©) para los

cinco prototipos de vigas analizadas. En particular, la Figura 7a muestra un daño excesivo por cortante en los tercios extremos de la viga convencional (VHA); las Figuras 7b y 7c presentan daño por cortante concentrado en fisuras inclinadas en los prototipos VHAC2

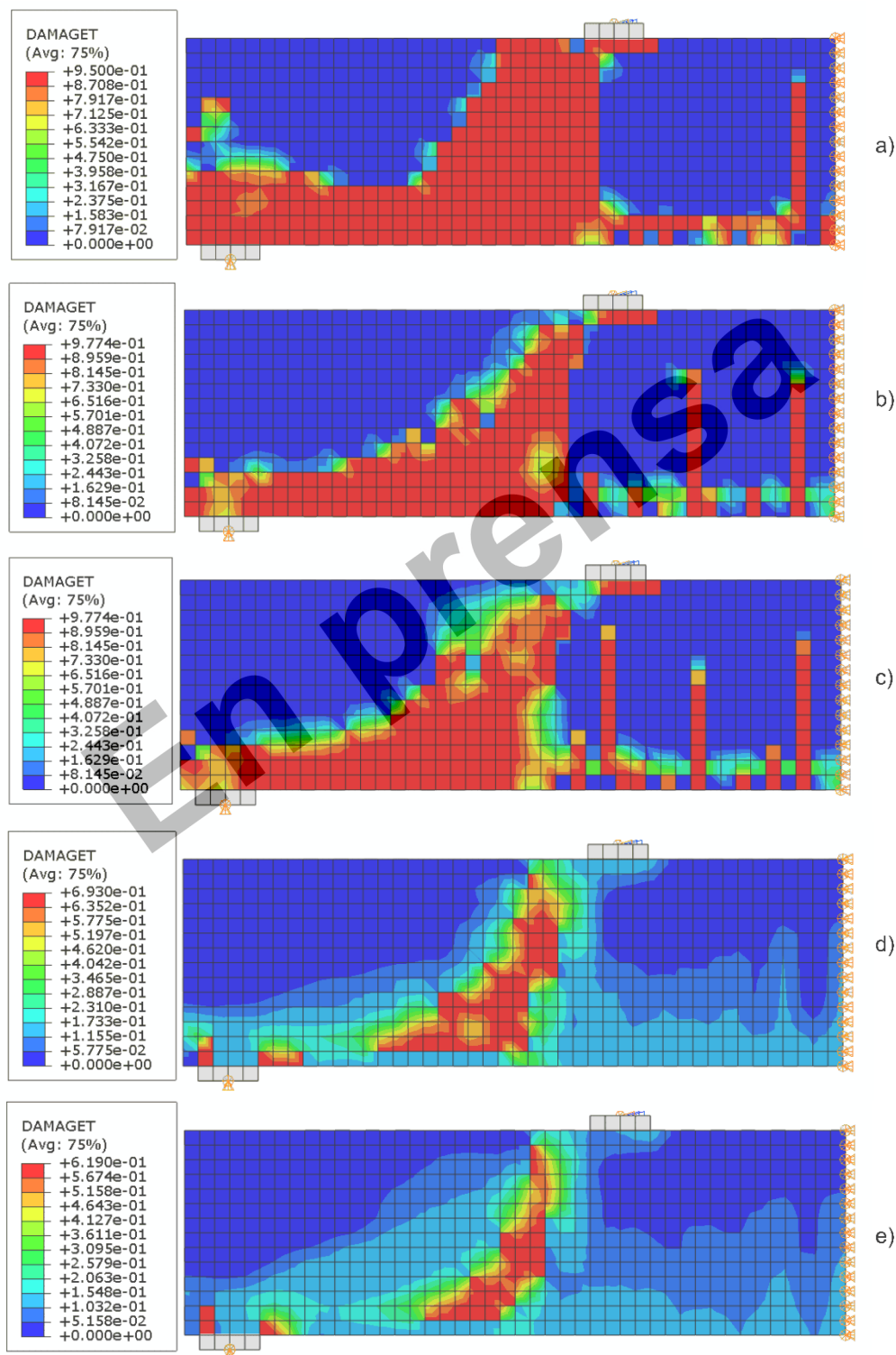


Figura 7. Daño a tracción: a) VHA; b) VHAC2; c) VHAC4; d) VHAF40; e) VHAF60.

y VHAC4; mientras que las Figuras 7d y 7e exhiben un comportamiento combinado de cortante y flexión, con patrones de fisuración distribuidos uniformemente en las vigas reforzadas con fibras (VHAF40 y VHAF60).

Por otro lado, la Figura 8 muestra los patrones de daño por tracción en los cuatro prototipos de losas (LHAS, LHAP, LHASF40 y LHASF60), analizando ambas caras (superior e inferior). Este análisis permite evaluar los patrones de fisuración considerando la degradación

progresiva del material. La Figura 8a, correspondiente a la losa de hormigón armado sin refuerzo a punzonado (LHAS), presenta un patrón de daño más concentrado e intenso en comparación con la Figura 8d, que representa la losa de hormigón reforzado con fibras (LHRF60).

Estos resultados evidencian que el uso de hormigón reforzado con fibras (HRF) reduce de manera significativa el daño por tracción en comparación con los hormigones armados

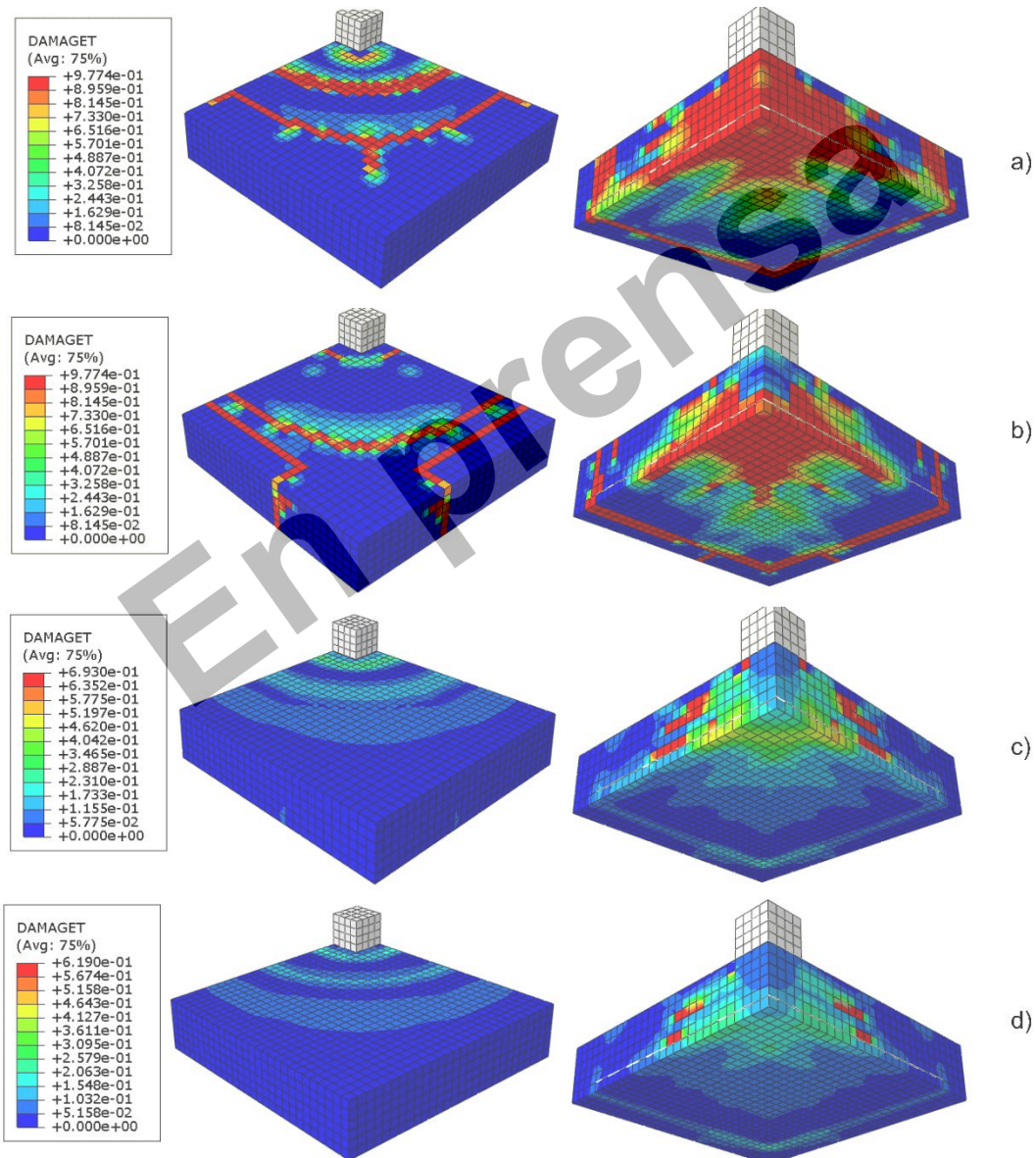


Figura 8. Daño a tracción: a) LHAS; b) LHAP; c) LHASF40; d) LHASF60. Izquierda cara superior, derecha cara inferior.

convencionales. Esta mejora se refleja en un mayor control de fisuración, un incremento en la capacidad de deformación (ductilidad) y una transición del modo de fallo de frágil a dúctil en el esfuerzo de punzonado.

Por lo tanto, podría ser necesario reevaluar los coeficientes de minoración de resistencia.

3.2 Curvas carga–desplazamiento

La Figura 9 presenta las curvas de carga-desplazamiento correspondientes a las vigas, donde se observa que la incorporación de fibras mejora la capacidad portante posterior a la carga pico, evidenciándose un descenso gradual en la curva que indica un comportamiento dúctil. La carga última $P_{U,NUM}$ del hormigón armado que incorpora 60 kg/m³ de fibras de acero (VHAF60) es ligeramente superior (1,9 %) a la carga última de los hormigones con armadura de corte con separación $d/2$ (VHAC2), pero inferior (8,6 %) a la carga última $P_{U,NUM}$ de los hormigones con armadura de corte con separación $d/4$ (VHAC4).

Esta diferencia sugiere que los requisitos reglamentarios podrían modificarse en relación a: la menor exigencia de armadura mínima de corte en nervios de losas casetonadas, o

incluso su reemplazo total, dependiendo de la cantidad de fibras utilizadas (40/60 kg/m³); y la modificación de la condición de separación máxima entre los nervios de la losa. Además, se observa un aumento en la rigidez de los hormigones con adición de fibras, lo que podría derivar en una posible disminución de las deformaciones y/o vibraciones en las losas casetonadas.

En la Tabla 2 se presentan los valores de diseño para las vigas analizadas, incluyendo la carga última ($P_{U,NUM}$) y el desplazamiento máximo (D_{NUM}) obtenidos a partir de la simulación numérica, así como los valores de carga última ($P_{U,CIRSOC}$) correspondientes a hormigones sin fibras, calculados según el Reglamento CIRSOC 201-2005 [17] y el Model Code 2020 [18]. Al comparar los resultados, se observa lo siguiente: Para VHA, la carga última $P_{U,NUM}$ es 53,9 % mayor que $P_{U,CIRSOC}$ y 65,2 % mayor que $P_{U,MC2020}$; para VHAC2, $P_{U,NUM}$ resulta 4 % menor que $P_{U,CIRSOC}$, pero 3,1 % mayor que $P_{U,MC2020}$; en el caso de VHAC4, $P_{U,NUM}$ es 14,1 % menor que $P_{U,CIRSOC}$ y 3,1 % menor que $P_{U,MC2020}$; para VHAF40, $P_{U,NUM}$ supera a $P_{U,MC2020}$ en un 44,7 %; y finalmente, en VHAF60, $P_{U,NUM}$ es 26,8 % mayor que $P_{U,MC2020}$. Estos resultados indican que los valores obtenidos mediante los modelos normativos del CIRSOC 201 y el Código Modelo 2020 tienden a ser más conservadores en comparación con los obtenidos a través de simulaciones numéricas.

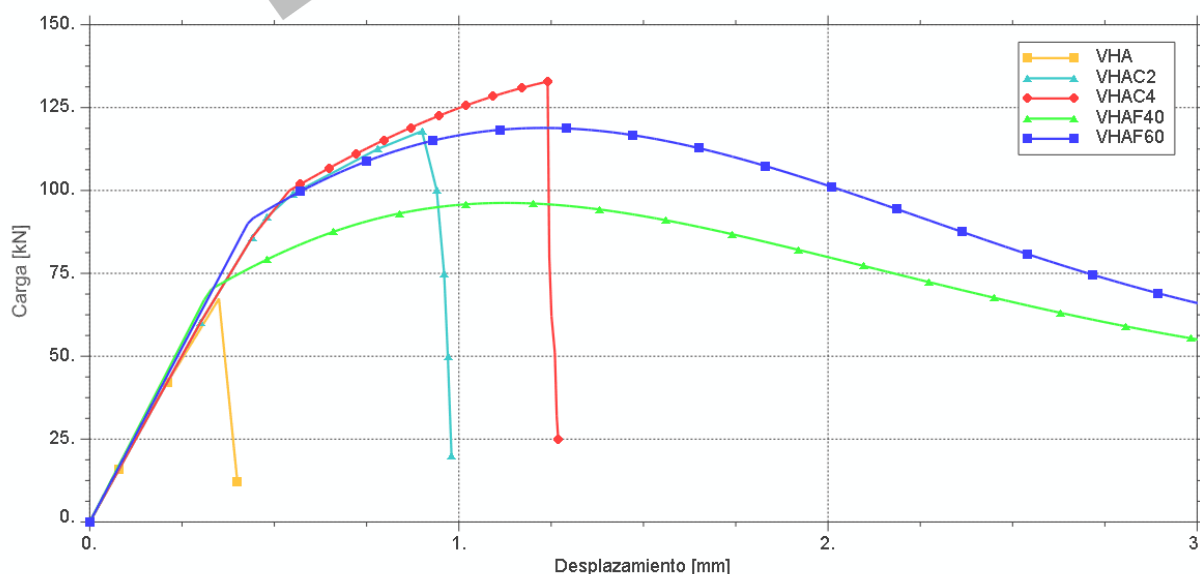


Figura 9. Curvas carga-desplazamiento de vigas.

La Figura 10 compara la respuesta carga-desplazamiento central de los diferentes hormigones para el caso de las losas.

La Tabla 3 muestra los valores de carga y desplazamiento (Pu y D) obtenidos de la simulación numérica, junto con los valores de falla según el modelo propuesto por Menétrey [19] y Model Code 2020 [18].

Al comparar los resultados obtenidos, encontramos lo siguiente: para LHAS PU_{NUM} es un 2,7 % menor que $PU_{Menetrey}$ y un 34,7 % mayor que PU_{MC2020} ; para LHAP PU_{NUM} es un 13,8 % menor que $PU_{Menetrey}$ y un 4,2 % mayor que PU_{MC2020} , para LHASF40 PU_{NUM} es un 6,7 % menor que PU_{MC2020} , finalmente para LHASF60 PU_{NUM} es un 4 % menor que PU_{MC2020} . Se aprecia que el modelo numérico

Tabla 2. Prototipos de vigas. Valores de diseño, carga y desplazamiento.

Prototipo	Arm. [mm]	Arma. de corte [mm]	Fibras [kN]	PU_{NUM} [kN]	PU_{CIRSOC} [kN]	PU_{MC2020} [kN]	D_{NUM} [mm]
	Inf/Sup						
VHA		-	-	67,4	43,8	40,8	0,35
VHAC2	2Ø16 /	Ø6c/80 (d/2)	-	117,9	122,8	121,7	0,90
VHAC4	2Ø10 /						
	estribo	Ø6c/40 (d/4)	-	132,9	154,8	137,2	1,24
VHAF40	Ø4,2c/250	-	40	96,2	-	66,5	1,12
VHAF60		-	60	118,9	-	93,8	1,23

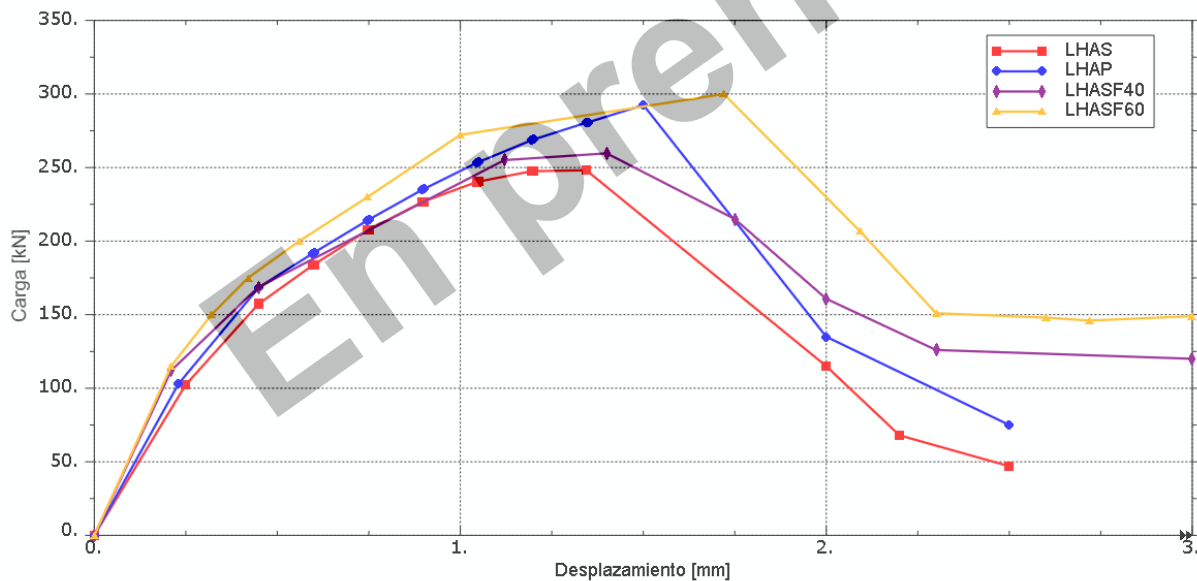


Figura 10. Curvas carga-desplazamiento de losas, obtenidas en simulación numérica.

Tabla 3. Prototipos y valores de carga última (PU) y desplazamiento (D), para losas.

Prototipo	Armadura a Punzonado [mm]	Fibras A° [kg/m3]	PU_{NUM} [kN]	$PU_{Menetrey}$ [kN]	PU_{MC2020} [kN]	D_{NUM} [mm]
LHAS	-	-	248,2	255,2	184,2	1,3
LHAP	4Ø8 + 4Ø8	-	292,5	339,5	280,7	1,5
LHASF40	-	40	259,7	-	278,5	1,4
LHASF60	-	60	299,9	-	312,5	1,7

de LHAS se ajusta mejor al modelo propuesto por Menétrey [19]; y los modelos numéricos para LHAP, LHASF40 y LHASF60 se ajusta mejor al modelo propuesto por el Model Code 2020 [18]. En general, se observa que la pérdida de resistencia post-pico es más controlada en los prototipos que incorporan HRF. Además, las curvas carga-desplazamiento revelan lo siguiente: las cargas máximas (P_u) de los hormigones sin armadura de punzonado pero con 40 kg/m³ y 60 kg/m³ de fibras de acero (LHASF40, LHASF60) son similares a las del hormigón con armadura de punzonado pero sin fibras (LHAS); sin embargo, al comparar la carga última (P_u) de LHAS con la carga de rotura (P_u) de LHASF40 y LHASF60, se registra un incremento en la capacidad portante del 4 % y 20 %, respectivamente.

4. Conclusiones

Este estudio analiza el comportamiento mecánico, las resistencias al corte y punzonado, de prototipos representativos de elementos de losas de entrepisos sin vigas del tipo casetonado de hormigón armado, reforzados con fibras de acero en diferentes cuantías, mediante simulaciones numéricas. A partir de las mismas surge que:

- La incorporación de fibras de acero, combinada con armadura convencional, mejora significativamente el desempeño mecánico, modifica los patrones de fisuración y los modos de fallo, y puede incrementar la capacidad de carga en ciertos casos.
- El aumento en la capacidad de carga podría permitir la modificación de la separación máxima reglamentaria de los nervios en losas casetonadas, sin la necesidad de añadir estribos como armadura de corte.
- Para un esfuerzo de corte que requiera estribos con separación de $d/2$, la incorporación de 40 kg/m³ de fibras de acero podría reemplazar parcialmente la armadura de diseño, mientras que con 60 kg/m³ de fibras, el reemplazo podría ser total.

- Para un esfuerzo de corte que demande estribos con separación de $d/4$, la adición de 60 kg/m³ de fibras de acero permitiría reemplazar parcialmente la armadura de diseño, o bien, se podría aumentar la separación a $d/2$, mejorando la ductilidad.

- El incremento de rigidez y ductilidad en los hormigones con fibras favorecería un comportamiento más eficiente en estado de servicio, reduciendo deformaciones y vibraciones.

- La incorporación de fibras reduce significativamente el daño por tracción, aumentando la ductilidad del hormigón en la falla por punzonado. Esto sugiere la posibilidad de evaluar modificaciones en los coeficientes de minoración de resistencias de las ecuaciones de dimensionado en los reglamentos o códigos estructurales.

- La adición de fibras de acero a una dosificación de 60 kg/m³ podría reducir la cantidad de armadura de refuerzo a punzonado, con el consiguiente ahorro en tiempos de construcción y mano de obra.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo contó con la financiación del Grupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras (GIMCE), de la Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional de Concepción del Uruguay; y el Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT) de la ciudad de La Plata.

Contribución de autoría

Y. Giupponi, C. Razetto: Conceptualización, Investigación, Metodología, Redacción-original-borrador, coautores principales, Contribución por igual al desarrollo de este trabajo; R. Zerbino, A. Conforti, E. Cuenca, V. Rougier: Conceptualización, Investigación, Revisión.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existen algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] Auad, A., Gutiérrez, S. E., y Sfer, D. (2018). Análisis experimental del punzonamiento en placas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. En AIE (Ed.), *XXV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural* (pp. 1–18). AIE.
- [2] Montagna, L. S. (2018). Resistencia al corte en dos direcciones de conexiones losa-columna de un sistema de losas sin vigas. En AIE (Ed.), *XXV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural* (pp. 1–21). AIE.
- [3] Hassanpour, M., Shafigh, P., y Mahmud, H. B. (2012). Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement - A review. *Construction and Building Materials*, 37, 452–461. <https://doi.org/p56m>
- [4] Kayali, O., Haque, M. N., Zhu, B. (2003). Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 207–213. (2003). <https://doi.org/dt79h5>
- [5] Kwak, Y.-K., Eberhard, M. O., Kim, W.-S., y Kim, J. (2002). Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 99(4), 530–538. <https://doi.org/p56n>
- [6] Parra-Montesinos, G. J. (2006). Shear strength of beams with deformed steel fibers. Evaluating an alternative to minimum transverse reinforcement. *Concrete International*, 28, 57–66.
- [7] Fédération Internationale du Béton. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn.
- [8] Teng, T.-L., Chu, Y.-A., Chang, F.-A., Shen, B.-C., y Cheng, D.-S. (2008). Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact. *Computational Materials Science*, 42(1), 90–99. <https://doi.org/djsf33>
- [9] Isla, F. (2014). *Modelo para hormigón reforzado con fibras* [Tesis Doctoral]. Universidad Nacional de Tucumán.
- [10] Ribeiro, T., y Serna, P. (2009). Numerical analysis of steel fiber reinforced concrete shells. En A. Domingo, y C. Lazaro (Eds.), *Proceedings of International Association for Shell and Spatial Structures* (pp. 1731–1742). Universidad Politécnica de Valencia.
- [11] Pérez, F. F. (2015). *Análisis numérico computacional del punzonado en losas de H^oA^o reforzado con fibras* [Tesis de Magister en Ingeniería Estructural]. Universidad Nacional de Tucumán. p. 49.
- [12] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2012). *IRAM 1546 Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de compresión*.
- [13] Technical Committee CEN/TC 229 (2005). EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) Method.
- [14] Hafezolghorani, M., Hejazi, F., Vaghei, R., Jaafar, M. S. B., y Karimzade, K. (2017). Simplified damage plasticity model for concrete. *Structural Engineering International*, 27(1), 68–78. <https://doi.org/f9qn6d>
- [15] Allam, A. M., Shoukry, M. S., Rashad, G. E., y Hassan, A. S. (2013). Evaluation of tension stiffening effect on the crack width calculation of flexural RC members. *Alexandria Engineering Journal*, 52(2), 163–173. <https://doi.org/p56q>
- [16] Comisión Permanente del Hormigón (2008). *EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. <https://www.transportes.gob.es/organos-colegiados/mas-organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/instrucciones/ehe-08-version-en-castellano>
- [17] Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación (2005). *INTI-CIRSOC. Reglamento argentino de estructuras de hormigón CIRSOC 201*. <https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/vigencia-2013/area100/area100a/reglamento201completo.pdf>
- [18] Fédération Internationale du Béton. (2024). *fib Model Code for Concrete Structures 2020*. International Federation of Structural Concrete.
- [19] Menétrey, P. (2002). Synthesis of punching failure in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24(6), 497–507. <https://doi.org/bc5nnf>