

ESTUDIO EXPERIMENTAL, ANALÍTICO Y NUMÉRICO DEL PUNZONADO EN LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADO CON FIBRAS

Rougier, Viviana C.; Denardi; Miqueas C.; González, Federico A.; Vercesi, Darío O.
Ingenieros Civiles, Docentes e Investigadores
Universidad Tecnológica Nacional – FRCU – FRCon
rougierv@frcu.utn.edu.ar

RESUMEN

En los sistemas de losas armadas en dos direcciones que apoyan directamente sobre las columnas, las cargas transferidas a las mismas, inducen tensiones elevadas que pueden producir el colapso de la estructura. Este tipo de falla conocido como punzonado es un modo de rotura frágil que podría ser catastrófico. Por ello, algunas estrategias que pueden adoptarse para mejorar la resistencia al punzonado son: utilizar ábacos, refuerzos adicionales al corte, hormigones de alta resistencia o fibras discretas únicas o híbridas. Además, se podría emplear un refuerzo combinado de barras de acero y fibras discretas. En este trabajo se presentan los resultados de ensayos de punzonado realizados en prototipos a escala de losas de hormigón armado reforzado con fibras (LHARF). Se construyeron y ensayaron un total de 8 losas: 2 losas de hormigón armado sin fibras, 5 LHARF de un solo tipo y una LHARF híbridas. Los resultados experimentales se compararon con predicciones analíticas de modelos existentes y modificados para predecir la resistencia a punzonado cuando se utilizan refuerzos de fibras híbridas. Además, se realizó la simulación numérica de los ensayos a través de un software de elementos finitos.

ABSTRACT

In two-way reinforced concrete slab systems supported directly on columns, the loads transferred to them induce high stresses that can produce collapse of the structure. This type of failure known as punching shear, is a brittle failure mode that could be catastrophic. Therefore, the punching behavior can be improved by adopting distinct strategies such as: using drop panels, additional shear reinforcement, high-strength concretes, or discrete single or hybrid fibers. Additionally, a reinforcement combining steel bars and discrete fibers could be employed. This study presents the results of punching shear tests conducted on scaled prototypes of fiber-reinforced concrete slabs (FRCS). A total of 8 slabs were constructed and tested: 2 reinforced concrete slabs without fibers, 5 FRCS of a single fiber, and one hybrid FRCS. The experimental results were compared with the predictions provided by existing models which were modified to predict punching shear strength when using hybrid fiber reinforcements. Furthermore, numerical simulation of the tests was performed through finite element software.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Los entrepisos sin vigas son sistemas de losas con armaduras cruzadas que apoyan directamente sobre las columnas sin interposición de vigas¹. En general, es un sistema estructural muy utilizado y aceptado en la construcción de edificios, pues ofrece una razonable flexibilidad constructiva permitiendo luces entre columnas de aproximadamente 4,5–6,0 m. La resistencia a flexión de este sistema estructural puede lograrse con espesores relativamente pequeños para la altura de la losa. Sin embargo, para evitar el modo de falla frágil por punzonamiento se requieren medidas de diseño específicas. Según diferentes códigos^{2,3,4} y la investigación disponible^{5,6,7,8} el comportamiento al punzonamiento puede mejorarse mediante la adopción de distintas estrategias, entre ellas colocar refuerzo adicional al corte (estribos doblados, perfiles y conectores de corte), ábacos, capiteles o fibras discretas (en particular, fibras de acero). Cuando se utiliza un refuerzo combinado (es decir, barras de refuerzo + fibras discretas), las fibras de acero (FA) principalmente incrementan la resistencia al corte y la capacidad de deformación, mientras que las barras de acero garantizan el refuerzo a flexión^{6,7,8}. El uso de macro fibras sintéticas, también ha permitido obtener mejoras de la resistencia a corte y un comportamiento dúctil en dosajes de 0.5 % y 1% en proporción de volumen de hormigón y en combinación con el refuerzo tradicional a flexión^{9,10}.

Por otro lado, también se puede utilizar una combinación de distintos tipos de fibras, dando lugar a los llamados hormigones reforzados con fibras híbridas (HRFH), donde el comportamiento post fisuración depende del contenido total de fibras y los tipos de fibras usados. Las fibras cortas y de diámetro pequeño, especialmente aquellas de relación de aspecto elevada, sirven como mecanismo de costura (puente o unión) para aperturas de fisuras pequeñas (0.2 a 0.3mm) y son beneficiosas en durabilidad. Por otra parte, para lograr un efecto de puente con fisuras mayores son necesarias fibras más largas y conformadas para brindar anclaje. Sin embargo, es importante destacar que las fibras mejoran las propiedades mecánicas del hormigón, no como un reemplazo de la armadura en barras sino como complemento de éstas pues pueden prevenir la propagación o el crecimiento en ancho de las microfisuras, controlando el proceso de fisuración¹¹.

Varios autores han propuesto expresiones analíticas para estimar la contribución de las fibras, en particular de acero, a la resistencia al punzonamiento basadas en los resultados obtenidos en programas experimentales^{12,13} incorporando el efecto de las fibras en la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón. Sin embargo, no se ha encontrado en la bibliografía disponible, una expresión que contemple el efecto de la hibridación de dos tipos de fibras, en este caso, FA y polipropileno (FPP), en dicha resistencia. Tanto la industria en general que utiliza cada vez más estos hormigones especiales, como la ingeniería civil, que recurre en muchas ocasiones al uso de sistemas híbridos, requieren el desarrollo de herramientas de diseño apropiadas.

Existen numerosos modelos constitutivos que permiten simular el comportamiento a

Organiza:

nivel material de hormigones convencionales reforzados con fibras y muchos de ellos utilizan modelos originalmente desarrollados para hormigón sin fibras como el modelo de microplanos¹⁴, modelos multifisuras distribuidas¹⁵ o modelos no lineales calibrados con resultados experimentales de ensayos de compresión y tracción^{16,17}, entre otros. En ningún caso, estos modelos incluyen la modelación explícita de la influencia de la adición de fibras, su proporción ni orientación¹¹. Los enfoques micro-mecánicos, en cambio, tienen en cuenta explícitamente el aporte de la matriz, las fibras e incluso la interfaz fibra/matriz en algunos casos. Estos diferentes enfoques pueden implementarse en programas comerciales de elementos finitos multipropósito que tienen incorporadas características que hacen posible modelar el HRF y obtener así modelos confiables que permitan el diseño de estructuras con estos tipos de hormigones.

En este trabajo se presentan los resultados experimentales, teóricos y numéricos de ensayos, realizados en losas de hormigón armado con refuerzo de fibras de acero y hormigón armado con refuerzo de fibras híbridas (FA y FPP), sin ningún tipo de refuerzo a corte. El estudio se centra en el comportamiento a punzonado de dichos elementos en términos capacidad resistente, patrón de fisuración, modos de falla e influencia del volumen y tipo de fibras incorporados. En primer lugar, se describe el programa experimental, los ensayos realizados y sus resultados. Luego se describen los modelos teóricos desarrollados por otros autores (referencias) para predecir la capacidad resistente a corte de los diferentes especímenes, con la modificación realizada en cada uno de ellos para considerar el efecto del refuerzo de fibras híbridas. A continuación, se describe el modelo numérico utilizado para reproducir el comportamiento del HRF. De este modo, para representar el comportamiento del hormigón en régimen no lineal se adopta un modelo de daño plástico disponible en el software comercial ABAQUS®, en tanto las fibras se consideran discretas y aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón. Finalmente se comparan los resultados obtenidos numéricamente con los valores experimentales y teóricos.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

A continuación se detallan los especímenes ensayados, características de los materiales y procedimiento de ensayo e instrumentación.

Descripción de especímenes ensayados

El programa experimental que forma parte de un proyecto de investigación en desarrollo, involucró el ensayo de 8 losas de hormigón armado sometidas a carga concentrada hasta la rotura. Las dimensiones de las losas fueron las mismas para todos los especímenes (1500 mm x 1500 mm x 60 mm). El espesor de las losas se adoptó en función de superar el espesor mínimo de una losa interior sin ábacos y sin vigas interiores recomendado por la Tabla 9.5.c) del Reglamento CIRSOC 201-2005². Para la armadura de flexión se emplearon barras ϕ del 10 mm cada 200 mm en ambas direcciones de manera de superar la cuantía mínima $\rho_{min.} = 0.0018$. No se colocó en ningún caso armadura de corte. En la Figura 1 se muestran los detalles de

Organiza:

armadura y sección de una losa. En la Tabla 1 se resumen la denominación y características de los especímenes ensayados. La dosificación teórica del hormigón fue la misma para todas las mezclas, excepto por la cantidad de fibras de acero y polipropileno. Se construyeron 2 losas (especímenes de control) de hormigón armado sin fibras, 2 especímenes de hormigón armado con una dosificación de 20 kg/m³ (0,25 %) de FA, 3 losas de hormigón armado con 50 kg/m³ (0,64 %) de FA, y 1 losa con 50 kg/m³ (0.64 %) de FA y 2,3 kg/m³ (0.24 %) de FPP. Tanto las dosificaciones de FA como de FPP se adoptaron teniendo en cuenta investigaciones de otros autores^{6,9,10}.

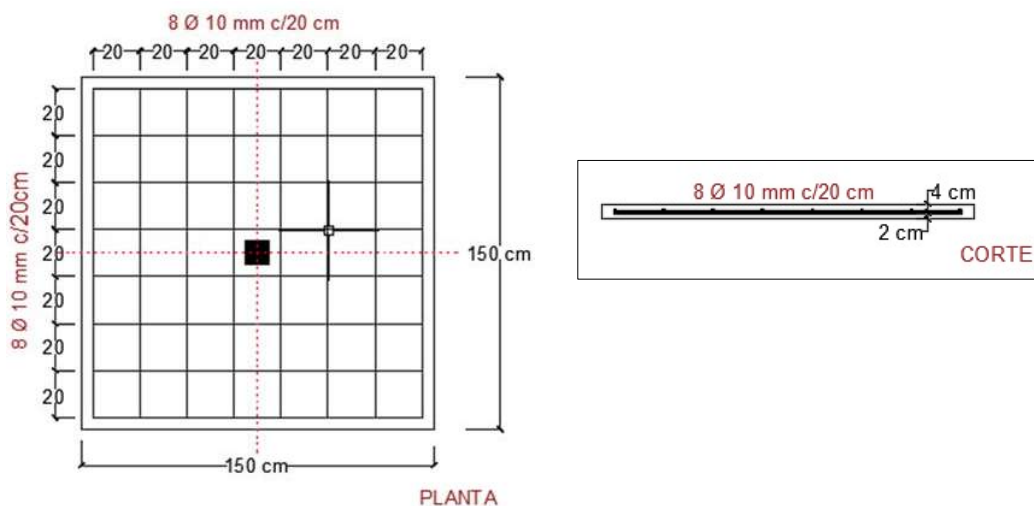


Figura 1. Esquema que detalla la armadura y sección de losa de H° A°

DENOMINACIÓN	CARACTERÍSTICAS
L1HA	Losa de H° A° - de Referencia o control
L2HA	Losa de H° A° - de Referencia o control
L1HARFA20	Losa de H° A° reforzado con 20 kg/m ³ de FA
L2HARFA20	Losa de H° A° reforzado con 20 kg/m ³ de FA
L1HARFA50	Losa de H° A° reforzado con 50 kg/m ³ de FA
L2HARFA50	Losa de H° A°-reforzado con 50 kg/m ³ de FA
L3HARFA50	Losa de H° A°-reforzado con 50 kg/m ³ de FA
L1HARFH50-2.3	Losa de H° A°-reforzado fibras híbridas FA (50 kg/m ³) y FPP (2.3 kg/m ³)

Tabla 1 – Detalle de las vigas ensayadas con su denominación y características

Organiza:

Características de los materiales: hormigón, armaduras de flexión y fibras

El hormigón utilizado en la ejecución de las losas se dosificó en planta hormigonera según el Método de Diseño Racional de Mezclas de Hormigón Armado del Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA), para cumplir los requerimientos del Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201-2005² y en función de obtener una resistencia a compresión a los 28 días de 30 MPa. Se trabajó con agregados de la zona y cemento Portland CPC50. Los especímenes fueron hormigonados y curados en planta (Figura 2).



Figura 2. Preparación y hormigonado de losas

Las características mecánicas del hormigón se determinaron mediante ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm, según normas IRAM 1546¹⁸ e IRAM 1658¹⁹. Se determinó una resistencia media a compresión del hormigón sin fibras (HS) a los 28 días de 35.00 MPa y de 35.15 MPa y 38.27 MPa para los hormigones con dosajes de FA de 20 kg/m³ (HRFA-20) y 50 kg/m³ (HRFA-50), respectivamente. Para el caso del hormigón reforzado con fibras híbridas HRFH-50-2.3 (50 kg/m³ de FA y 2.3 kg/m³ de FPP) el valor de resistencia media a la compresión a los 28 días fue de 38.85 MPa. En la Figura 3 se pueden ver los valores de resistencia a tracción simple por compresión diametral, obtenidos para los diferentes hormigones, a la edad de 28 días. Se observa que el mayor incremento en resistencia se obtuvo para el hormigón reforzado con fibras híbridas (HRFH-50-2.3): 6.98 MPa frente a 4.79 MPa, 5.39 MPa y 6.77 MPa, para el hormigón sin fibras, el hormigón reforzado con 20 kg/m³ de FA y el hormigón reforzado con 50 kg/m³ de FA, respectivamente. Las fibras híbridas de acero y polipropileno, debido al efecto sinérgico entre ambas, mejoran la matriz en varios niveles, lo que conduce a un incremento de la resistencia a tracción del material compuesto. El proceso de extracción (pull out) de la fibra de acero suele ir acompañado de una extensa zona micro fisurada dentro de la matriz circundante y así, este proceso activa las FPP que actúan como puente de tensiones en dicha zona, aumentando la resistencia al despegue y extracción de la fibra de acero²⁰. El mecanismo descrito conduce a la mejora general de las propiedades de tracción del material.

Organiza:

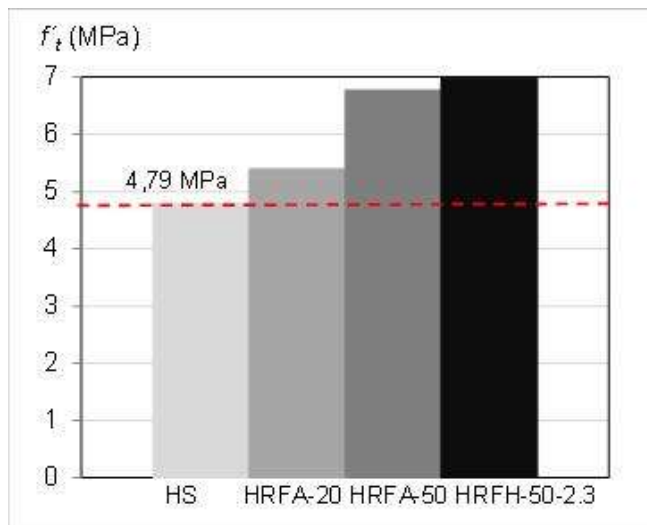


Figura 3. Resistencias a tracción uniaxial por compresión diametral (f_t) a los 28 días.

Para las armaduras de flexión se empleó en todos los especímenes acero de Dureza Natural Acindar denominado comercialmente DN A-42.

Para el hormigón reforzado con fibras se emplearon fibras de acero y macrofibras de polipropileno, ambas disponibles en el mercado argentino. En la Tabla 2 se presentan las características geométricas de los dos tipos de fibras utilizados y algunas de sus propiedades más importantes. Las fibras fueron agregadas al hormigón, de manera manual y directamente a la mezcladora antes que el agua, cuidando que sea de manera gradual para asegurar una adecuada dispersión.

MATERIAL	LONGITUD (mm)	DIAMETRO (mm)	DENSIDAD (kg/m ³)	MÓDULO (GPa)
Acero - Tipo FF1	50	1,00	7840	210
Polipropileno	50	1.20	920	6

Tabla 2 – Características de las fibras empleadas

Las fibras de acero, denominadas comercialmente como WIRAND® FF1, se fabrican con alambre de acero de bajo carbono y de alta resistencia a la tracción (1100 MPa), tienen un alto módulo de elasticidad y, al contrario de las fibras sintéticas, son susceptibles a la corrosión. Tienen además una relación de aspecto (AR) (longitud / diámetro) de 50 y son del tipo extremo en gancho (Figura 3 a).

Las fibras de polipropileno (FPP), denominadas comercialmente como NTH Grilon®, son fibras sintéticas recortadas de materiales poliméricos. Este tipo de fibras son

Organiza:

químicamente inertes, tienen gran estabilidad volumétrica, bajo módulo de elasticidad y bajo punto de fusión (Figura 3 b).

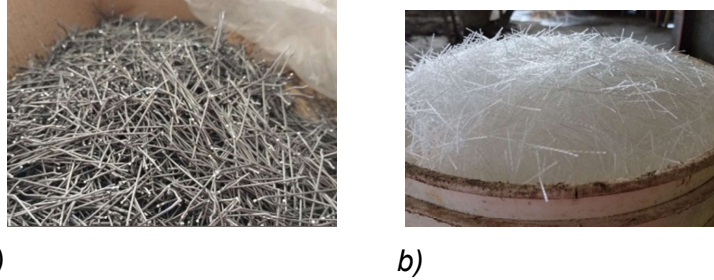


Figura 3. Fibras empleadas: a) Fibras de acero; b) Fibras de polipropileno

Procedimiento de ensayo e instrumentación

Las losas fueron posicionadas sobre un marco de acero diseñado al efecto (Figura 4 a). Se midió la carga aplicada sobre una superficie central de 100 x 100 mm (Figura 4 b). Es decir, todos los especímenes fueron ensayados bajo carga concéntrica utilizando un pistón conectado a un gato hidráulico con capacidades de 300 kN. La carga aplicada fue incrementada gradualmente desde cero hasta la carga de falla. Se colocaron láminas de neopreno (100 x 100 x 20 mm) entre el pistón y la parte superior de la losa para asegurar un contacto completo con la superficie de carga.

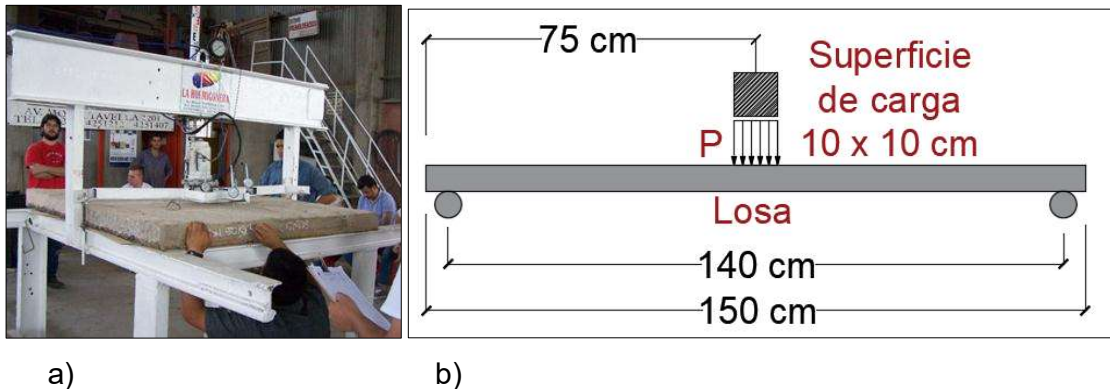


Figura 4. Esquema de ensayo e instrumentación: a) disposición de un espécimen y equipo de medición de carga; b) esquema de implementación de carga

RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. Se analizan cargas y modos de falla.

Organiza:

Cargas y modos de falla

Los resultados de las losas ensayadas se muestran en la Tabla 3, donde se resumen la resistencia última a punzonado (V_u) y la carga máxima promedio (V_{up}). Los resultados indican que la capacidad de carga de las losas aumenta ligeramente, en el caso de los especímenes de hormigón armado reforzado con fibras de acero, a medida que aumenta el contenido de dichas fibras con respecto a las losas de hormigón sin fibras. Por otro lado, se observa una disminución de dicho valor de carga para la losa de hormigón armado reforzado con fibras híbridas, en comparación con los especímenes de hormigón sin fibras, y de hormigón reforzado con fibras de acero. Ello pudo deberse a la fracción volumen de fibras de polipropileno utilizadas, que en combinación con una fracción alta de volumen de FA, podrían haber perjudicado la trabajabilidad de la mezcla. Según algunas investigaciones de otros autores, en sistemas de refuerzo híbridos utilizados en diferentes tipos de elementos estructurales, las FPP deben agregarse en bajos volúmenes, comprendidos entre 0.05% y 0.2 %, con el fin de evitar la aparición de erizos (segregación de fibras) localizados y asegurar la distribución uniforme de las fibras^{20,21}.

ESPÉCIMEN	FIBRAS		V_u (kN)	V_{up} (kN)
	Acero (kg/m ³)	Polipropileno (kg/m ³)		
L1HA	—	—	47.00	52
L2HA	—	—	57.00	
L1HARFA20	20		52.00	55
L2HARFA20	20		58.00	
L1HARFA50	50		54.00	56.4
L2HARFA50	50		65.20	
L3HARFA50	50		50.00	
L1HARFH50-2.3	50	2.3	46.00	46

Tabla 3 – Resultados experimentales

Organiza:

En las Figuras 5 a,b,c, y d se muestra el patrón de fisuración de cada tipo de losa ensayada, en la etapa final al alcanzar la carga de rotura. Las fisuras en los especímenes de H° A° sin fibras se iniciaron en el punto central de la losa (punto de carga) y luego, al aumentar la carga, se propagaron hacia los apoyos, con fisuras de tamaño considerable y desprendimiento de material. En el caso de las losas de H° A° reforzado con fibras de acero con una dosificación de fibra de 20 kg/m³, el esquema de fisuración fue muy similar. En el caso de los especímenes de H° A° con una fracción de volumen de FA de 50 kg /m³ la falla fue más dúctil y se centró alrededor del centro de la muestra, al igual que en la losa de H° A° reforzada con fibras híbridas.



a)



b)



c)



d)

Figura 5. Patrón de fisuración de las losas: a) Losa de H° A° sin fibras, b) Losa de H° A° reforzado con FA (20 kg/m³), c) Losa de H° A° reforzado con FA (50 kg/m³), d) Losa de H° A° reforzado con fibras híbridas (50 kg/m³ de FA y 2.3 kg/m³ de FPP).

ANÁLISIS TEÓRICO

El reglamento argentino CIRSOC 201-2005² establece para la determinación del valor de la carga de rotura al punzonado el siguiente criterio de Diseño, aplicado a losas de hormigón armado sin refuerzos de fibras:

El diseño de las secciones transversales sometidas a esfuerzos de corte se debe Organiza:

basar en la expresión:

$$\phi V_n \geq V_u, \quad (1)$$

Siendo V_u el esfuerzo de corte mayorado en la sección considerada y V_n la resistencia nominal al corte determinada de la siguiente manera:

$$V_n = V_c + V_s, \quad (2)$$

Donde V_c es la resistencia nominal al corte proporcionada por el hormigón y V_s la resistencia nominal al corte proporcionada por la armadura de corte.

Para losas de hormigón armado, el valor de V_c a considerar será el menor de aquel obtenido de las expresiones a), b) o c):

$$a) V_c = \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \cdot \frac{\sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d}{6}, \quad (3)$$

Siendo β la relación entre el lado mayor y el lado menor de la columna, de la carga concentrada, o de la superficie de introducción de la reacción; f'_c la resistencia a la compresión cilíndrica del hormigón; b_o el ancho de la columna y d la altura útil de la losa;

$$b) V_c = \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_o} + 2\right) \cdot \frac{\sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d}{12}, \quad (4)$$

Donde α_s es una constante cuyo valor depende de la posición de la columna, resultado: 40 para columnas interiores; 30 para columnas de borde y 20 para columnas de esquina;

$$c) V_c = \frac{\sqrt{f'_c} \cdot b_o \cdot d}{3} \quad (5)$$

Según los datos geométricos de los especímenes evaluados en este trabajo, y para una impronta de carga de 100 x 100 mm, reemplazando en las ecuaciones anteriores, se obtienen los valores de V_c . El menor valor obtenido corresponde a la ecuación (5) y es igual a 44.17 kN (para el valor de $f'_c = 35$ MPa). Por lo tanto, la resistencia última teórica a punzonado será:

$$V_u = \phi V_c = 0.75 \times 44.17 \text{ kN} = 33.12 \text{ kN} \quad (6)$$

Por otra parte, para el análisis teórico se adoptaron los modelos de los investigadores Narayanan y Darwish (1987)¹² y Harajli et al. (1995)¹³. Ambos modelos fueron desarrollados considerando HRF de acero, por lo tanto, en este trabajo se realizó una adaptación con el fin de predecir la carga de punzonado máxima en losas HRF híbridas. A continuación, se describen los modelos mencionados:

Modelo de Narayanan y Darwish (1987)¹²

En el modelo propuesto por Narayanan y Darwish (1987)¹² la resistencia última al punzonado en losas de hormigón reforzado con fibras se puede predecir con la siguiente expresión:

Organiza:

$$V_u = \lambda_s (0,24 \cdot f_{spf} + 16 \cdot \rho + v_b) \cdot b_{pf} \cdot d \quad (7)$$

Donde d es la altura útil de la losa; ρ es la cuantía de armadura de flexión;

v_b es la tensión de extracción vertical de la fibra a lo largo de la fisura inclinada generada por el punzonado. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v_b = 0,41 \cdot \tau \cdot F_f, \quad (8)$$

siendo τ la tensión máxima de unión fibra-matriz estimada por Voo-foster como $0,429 \cdot \sqrt{f_{cm}}$; Además, f_{cm} es la resistencia media a la compresión cilíndrica igual a 30 MPa;

$$F_f = \frac{l_f}{d_f} \cdot \rho_f \cdot k_b \quad (9)$$

donde l_f y d_f son la longitud y el diámetro de las fibras, respectivamente; ρ_f es la cuantía de fibras en porcentaje; k_b es un coeficiente obtenido experimentalmente mediante ensayos de pull-out, que considera la adherencia fibra-matriz y se estima en 1 para fibras con extremos conformados;

f_{spf} es la resistencia a la tracción por compresión del HRF que se calcula con la siguiente ecuación:

$$f_{spf} = \frac{f_{cm}}{20 - \sqrt{F_f}} + 0,7 + \sqrt{F_f}; \quad (10)$$

b_{pf} es el perímetro crítico para HRF. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$b_{pf} = b_p \cdot (1 - 0,55 \cdot F_f), \quad (11)$$

siendo b_p el perímetro crítico e igual a $b_0 + 3 \cdot \pi \cdot h$, donde b_0 el perímetro de la columna y h la altura total de la losa;

Finalmente, λ_s es un coeficiente experimental que está relacionado con la altura útil de la losa y se calcula $1,6 + 0,002 \cdot d$.

Modelo de Harajli et al. (1995)¹³

En el modelo propuesto por Harajli et al. (1995)¹², la resistencia última al punzonado en losas de hormigón reforzado con fibras se puede predecir con la siguiente expresión:

$$V_u = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot (f_{pcd} + v_b) \cdot b_{pf} \cdot d \quad (12)$$

Donde:

f_{pcd} es la resistencia a la tracción del HRF que se estima en $0,2 \cdot \sqrt{f_{cm}}$, siendo f_{cm} la resistencia media a la compresión cilíndrica del hormigón;

v_b es la tensión de extracción vertical de la fibra a lo largo de la fisura inclinada generada por el punzonado. Se calcula mediante la ecuación 7.

Organiza:

$\beta_d = \sqrt[4]{\frac{1000}{d}}$, siendo h la altura útil de la losa;

$\beta_p = \sqrt[3]{100 \cdot \rho}$, siendo ρ es la cuantía de armadura de flexión;

$\beta_r = 1 + \frac{1}{1+0,25 \cdot b_0/d}$, siendo b_0 el perímetro de la columna;

b_{pf} es el perímetro crítico para HRF. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$b_{pf} = (b_0 + \pi \cdot d) \cdot (1 - 0,32 \cdot F_f), \quad (13)$$

siendo d la altura útil de la losa y F_f el factor de fibras calculado según la expresión.

Modificación de los modelos de Narayanan y Darwish (1987)¹² y de Harajli et al. (1995)¹³ para considerar las fibras híbridas.

La mejora de la matriz circundante a las FA por la presencia de las FPP se puede modelar, de manera simplificada, como una presión radial que actúa sobre la superficie de las FA e incrementa su resistencia al arrancamiento. La mejora mencionada, impacta en la tensión máxima de unión fibra-matriz τ incrementando su valor, en función de dos factores obtenidos experimentalmente por Deng et al. (2018)²², el coeficiente de fricción matriz-acero (μ) y el volumen de FA (V_{FA}) y FPP (V_{FPP}) empleados, según la siguiente ecuación:

$$\tau_{HRFH} = \tau + \mu(1,22 V_{FA} + 28,74 V_{FPP}) \quad (14)$$

donde el valor de μ puede estimarse en 0,3 según las recomendaciones de Li et al. (1991)²³. El nuevo valor τ_{HRFH} es empleado en la ecuación 7 para determinar la tensión de extracción vertical de la fibra (v_b) a lo largo de la fisura inclinada generada por el punzonado.

RESULTADOS TEÓRICOS

En la Tabla 4 se presentan los valores de resistencia última a punzonado, V_u , obtenidos experimentalmente y los valores teóricos de los modelos de Narayanan y Darwish(1987)¹² y Harajli et al. (1995)¹³. También se muestran los valores de V_u proporcionados por el CIRSOC 201-2005² para losas de H° A° y el correspondiente a la losa de H° A° reforzado con fibras híbridas. Este último modelo fue obtenido a partir de la modificación de Narayanan y Darwish(1987)¹² y Harajli et al (1995)¹³. Se observa que el modelo de Harajli et al. (1995)¹³ se ajusta mejor a los valores experimentales obtenidos para las losas sin fibras. Para aquellas con refuerzo de 20 kg/m³ de FA los dos modelos dan resultados próximos, sobreestimando el modelo de Harajli et al. (1995)¹³ el valor de V_u en un 0.5 %. Para las losas de hormigón con refuerzo de 50 kg/m³ de FA los dos modelos sobreestiman la resistencia a punzonado. En el caso de la losa de hormigón con fibras híbridas, los valores de resistencia resultan sobreestimados en 28 % para el modelo modificado de Narayanan y Darwish (1987)¹² y 30 % para el modelo modificado de Harajli et al. (1995)¹³. Ello podría deberse a que los modelos no tienen la capacidad de

Organiza:

representar los aspectos vinculados a la tecnología del HRF, como podrían ser los cambios en la consistencia y la cohesión del material que se generan a partir de la inclusión de las fibras²⁴. Es decir que, las diferencias mencionadas, se dieron por las simplificaciones que se deben adoptar para el cálculo teórico debido a la gran cantidad de variables relacionadas al problema. Para todos los modelos se adoptó una resistencia a compresión uniaxial $f'_c = 35$ MPa (valor experimental)

LOSA	RESISTENCIA ÚLTIMA A PUNZONADO, V_u (kN)				
	Exp.	Exp. promedio	CIRSOC 201-2005 ²	Modelo de N y D ¹²	Modelo de H et al. ¹³
L1HA	47.00	52.00	33.12	44.00	51.80
L2HA	57.00				
L1HARFA20	52.00	55.00	-	52.80	55.30
L2HARFA20	58.00				
L1HARFA50	54.00	56.40	-	58.60	59.60
L2HARFA50	65.20				
L3HARFA50	50.00				
L1HARFH50 -2.3	46.00	46.00	-	58.90	59.80

Tabla 4 – Comparación de valores de carga de rotura experimentales y teóricos

ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS

A fin de modelar el comportamiento no lineal de losas H°A° sin refuerzo de fibras, y losas de H° A° reforzado con 20 kg/m³ y 50 kg/m³ de FA, se construyó un modelo tridimensional utilizando el programa de elementos finitos ABAQUS ®. Para representar el comportamiento en régimen no lineal del hormigón se adoptó un modelo de daño plástico y en el caso de las losas de HRFA se consideró a las fibras de acero discretas aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón.

Modelos constitutivos y propiedades mecánicas

Hormigón:

Para modelar el comportamiento del hormigón armado existen diferentes enfoques y modelos constitutivos que caracterizan su comportamiento. Uno de los aspectos que

Organiza:

debe tener en cuenta un modelo de hormigón es su capacidad para capturar características destacadas tales como el ablandamiento (comportamiento post-pico). Un enfoque es considerar un modelo de daño plástico ^[25,26], disponible en la librería de ABAQUS® (Concrete Damage Plasticity). El modelo considera los fenómenos más importantes del hormigón tanto en tracción como en compresión y fue creado para estudiar los efectos de daños irreversibles asociados a los mecanismos de fallos en el hormigón. El comportamiento no lineal del material puede ser atribuido a dos procesos mecánicos combinados: plasticidad y daño. A fin de representar la respuesta uniaxial en tracción y compresión el modelo supone dos mecanismos de falla diferenciado para tracción y compresión. Además, el modelo requiere definir los valores de módulo elástico, relación de Poisson, parámetros de daño-plástico y descripción del comportamiento (curvas $\sigma - \epsilon$) en tracción y compresión. Los parámetros de plasticidad: ángulo de dilatancia, ($\psi = 38$) excentricidad de flujo potencial (0.1), relación de tensiones (compresión equibiaxial inicial dividida por la compresión uniaxial inicial: $f_{bo}/f_{co} = 1.16$), relación del segundo invariante de tensión sobre el meridiano de tracción ($K_c = 0.6667$) la viscosidad (0.001) fueron adoptados de acuerdo a la documentación Abaqus.

Comportamiento a compresión uniaxial del hormigón.

El comportamiento a compresión en el modelo CDP de ABAQUS® se define como tensión vs. deformación inelástica. Dicha relación se obtuvo utilizando el modelo para hormigón no confinado del CEF-FIB 2010⁴. En la Figura 6a se muestra la curva a compresión uniaxial adoptada en el modelo.

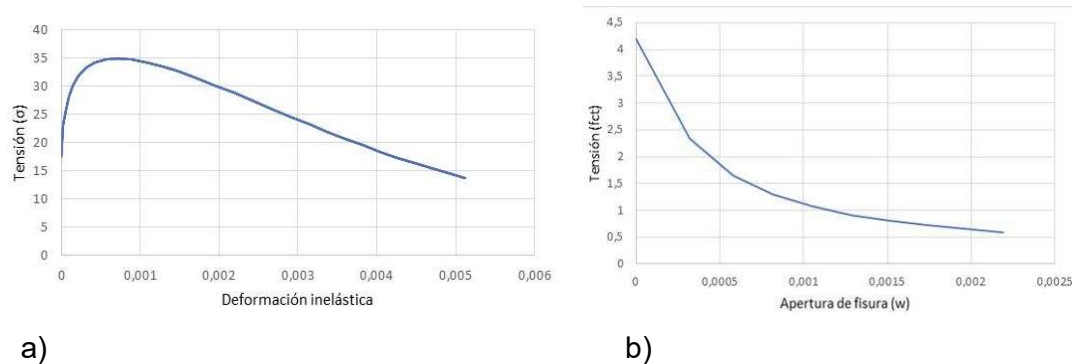


Figura 6. Curvas de comportamiento a compresión y tracción uniaxiales adoptadas en el modelo CDP: a) Compresión uniaxial; b) tracción uniaxial

Comportamiento a tracción uniaxial

El comportamiento a tracción del hormigón se supone elástico lineal hasta la tensión de tracción máxima. El pico de tensión a tracción f_{ctm} se calculó de acuerdo al CEF-FIB 2010⁴. Para definir el comportamiento de ablandamiento se utilizó un gráfico de tensión vs. apertura de fisura ($f_{ct} - w$). Este concepto de fractura frágil es definido como la energía de fractura (G_f) requerida para abrir una fisura de una unidad de Organiza:

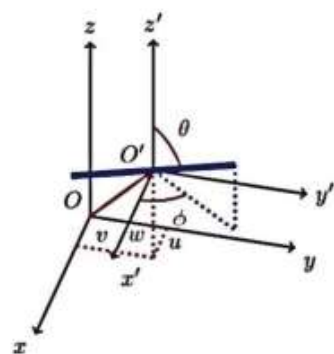
área. EL valor de G_f se calculó de acuerdo al CEF-FIB 2010⁴. Para definir la relación tensión- apertura de fisura se consideró la aproximación del CEF-FIB 2010⁴. En la Figura 6 b se muestra la curva adoptada en el modelo.

Fibras

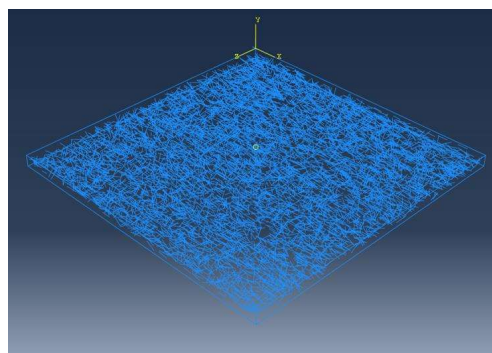
Las fibras se modelaron discretas y aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón. Para ello, se adoptó un algoritmo desarrollado por Ferrado F. et al., 2023²⁷ que requiere como parámetros de entrada el número de fibras en la losa, las características geométricas de las fibras y las de la losa.

Distribución aleatoria de fibras

La ubicación de cada fibra de longitud L_f está determinada por las coordenadas de su punto medio O' y su vector dirección. Las coordenadas del punto medio (u, v, w) definen la posición del punto medio y el par de ángulos (θ, ϕ) con $0 \leq \theta \leq \pi$ y $0 \leq \phi \leq 2\pi$ determina la orientación de la fibra. La Figura 7 a muestra esos parámetros en un sistema coordenado. El número de fibras para una elemento tipo losa queda determinado por el dosaje (kg/m^3), el número de fibras por kilogramo y el volumen de la losa. Este número de fibras sirve como parámetro de entrada al algoritmo desarrollado por Ferrado F. et al., 2023²⁷ que genera aleatoriamente la posición y orientación de cada fibra en la losa. Las fibras son creadas como líneas rectas con longitud y área de la sección determinadas. El algoritmo se implementa como un script de Python ejecutado por ABAQUS ®. La figura 7 b muestra un ejemplo de la nube de fibras generada por dicho algoritmo.



a)



b)

Figura 7. Nube de fibras con distribución y orientación aleatoria: a) parámetros de ubicación en el espacio de las fibras; b) Distribución de fibras de acero en la losa

Modelo de elementos finitos del ensayo a punzonado de la losa

El modelo del ensayo a punzonado de la losa consiste en una placa de carga de acero superior y la losa simplemente apoyada en todos sus bordes. La carga es aplicada como un desplazamiento vertical controlado en la placa superior. La

Organiza:

interacción entre la losa y la placa de carga se modeló como “tie” (los nodos entre la placa y la losa quedan “totalmente pegados”). La armadura y la nube de fibras de acero se consideran totalmente embebidas en el hormigón teniendo en cuenta la interacción entre estos dos materiales.

El tipo de elemento finito adoptado en el modelo para la losa y la placa de carga es del tipo C3D8R. Se utilizó un tamaño de elemento finito de 25 mm para la losa y la placa de aplicación de carga. La armadura de acero y las fibras de acero se mallaron con elementos finitos truss del tipo “T3D2” con dos nodos e interpolación lineal. A continuación, en la Figura 8 se muestran detalles del mallado.

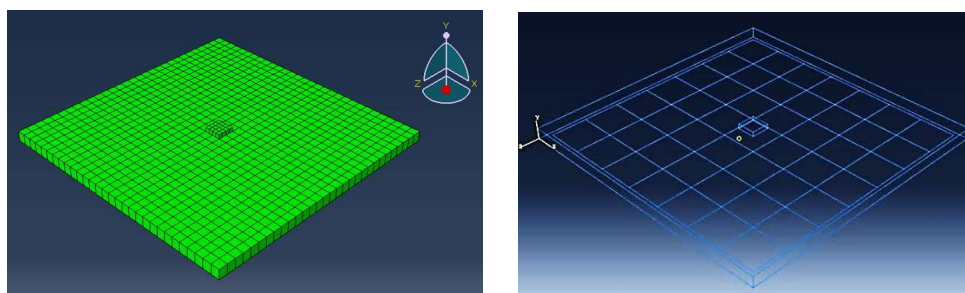


Figura 8. Malla de elementos finitos

COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS, TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

En la Figura 9 se comparan los valores promedio de resistencia última a punzonado, V_u , obtenidos experimentalmente, mediante los modelos teóricos de Narayanan y Darwish (1987)¹² (N y D) y de Harajli et al. (1995)¹³ (H et al.) y a través del modelo numérico presentado en la sección anterior, correspondientes a los diferentes especímenes analizados. Al comparar los resultados numéricos y experimentales, se observa que para las losas de hormigón reforzado con FA, LHARFA20 y LHARF50 las diferencias porcentuales si bien son bajas, 6.4% y del 8.2 %, respectivamente, sobreestiman los resultados experimentales. Los modelos teóricos también sobrestiman esos valores pero en menor medida.

Finalmente, es importante aclarar que es necesario continuar realizando ensayos experimentales que permitan lograr una mejor calibración tanto de los modelos teóricos como del modelo numérico, así como también una caracterización más completa de los hormigones reforzados con fibras híbridas que incluya la resistencia a flexión. Esto último de fundamental importancia para la simulación numérica.

Organiza:

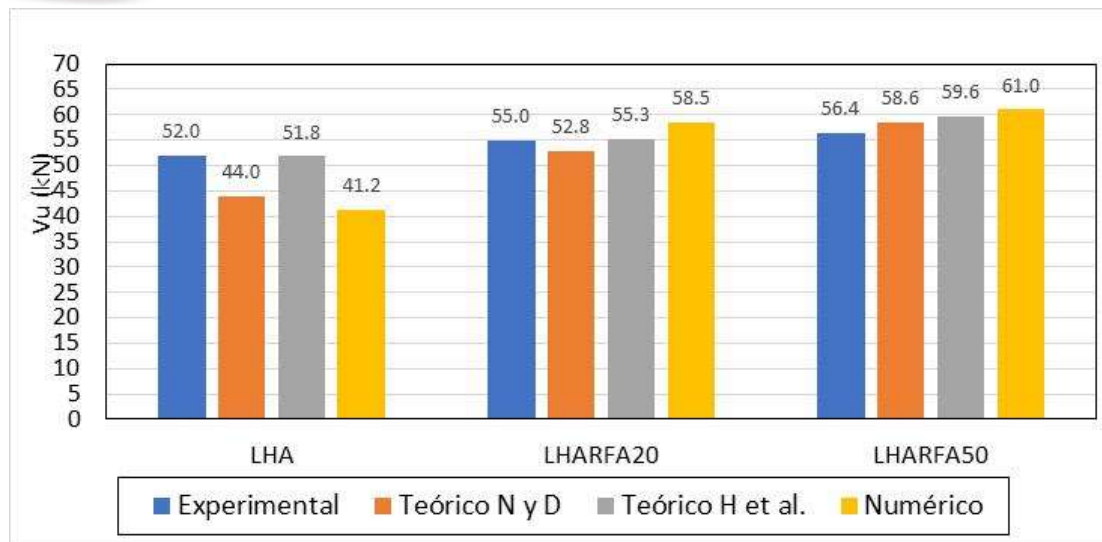


Figura 9. Comparación de resultados experimentales, teóricos y numéricos

CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado resultados experimentales, teóricos y numéricos de ensayos, realizados en losas de hormigón armado con refuerzo de FA y hormigón armado con refuerzo de fibras híbridas (FA y FPP), sin ningún tipo de refuerzo a corte. El estudio se centró en el comportamiento a punzonado de dichos elementos en términos capacidad resistente, patrón de fisuración, modos de falla e influencia del volumen y tipo de fibras incorporados. Aun cuando es necesaria la ejecución de un mayor número de ensayos experimentales, del análisis y la comparación de dichos resultados se puede decir lo siguiente:

Las losas de H°A° reforzadas con fibras de acero, en las dos proporciones de volumen estudiadas, 20 y 50 kg/m³, mostraron incrementos de la resistencia última a punzonado, de 5.7 % y 8.5 % respectivamente, con respecto a los especímenes de H° A° sin fibras. La losa de hormigón armado reforzado con fibras híbridas, alcanzó menor resistencia, en comparación con los especímenes de hormigón sin fibras, y de hormigón reforzado con fibras de acero, probablemente debido a la fracción volumen de fibras de polipropileno utilizadas, que en combinación con una fracción alta de volumen de FA, podrían haber perjudicado la trabajabilidad de la mezcla.

En cuanto a los modos de falla, las losas sin fibras y las losas con 20 kg/m³ de FA, mostraron rotura similar, esto es fisuras de tamaño considerable con desprendimiento de material. En el caso de los especímenes de H° A° con una fracción de volumen de FA de 50 kg /m³ y losa de H° A° reforzada con fibras híbridas la falla se centró alrededor del centro de la muestra, con fisuras de menor tamaño y mayor ductilidad.

Los modelos teóricos analizados para evaluar la resistencia última a punzonado de

Organiza:

las losas sin fibras y de las losas de HRFA dieron resultados aceptables. El mejor ajuste con respecto a los valores experimentales, se observó con el modelo de Harajli et al. (1995)¹³, para las losas de hormigón sin fibras y reforzadas con 20 kg/m³ de FA, en porcentajes del -0.3 % y 0.5 %, respectivamente. En el caso de la losa de hormigón con fibras híbridas, los valores de resistencia resultan sobreestimados en 28 % para el modelo modificado de Narayanan y Darwish (1987)¹² y 30 % para el modelo modificado de Harajli et al. (1995)¹³. Ello podría deberse a que los modelos no tienen la capacidad de representar aspectos como cambios en la consistencia y la cohesión del material que se generan a partir de la inclusión de las fibras.

El modelo numérico mostró una sobreestimación de la resistencia última a punzonado para las losas de hormigón reforzadas con FA. Al igual que los modelos teóricos, el modelo numérico no tiene la capacidad de reproducir aspectos relacionados con la tecnología del hormigón como la trabajabilidad de la mezcla que resulta afectada por el mayor contenido de fibras. Es por ello que se observó una tendencia a estimar una mayor resistencia a mayor volumen de fibras.

Colaboradores: Los autores destacan la colaboración de los alumnos de 5^{to} año de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concordia de la Universidad Tecnológica Nacional en la ejecución de las tareas de hormigonado y realización de ensayos.

Agradecimientos: Los autores del trabajo agradecen a los Ingenieros Guillermo y Eduardo Bevilaqua propietarios de la empresa COINAR SRL, por el apoyo económico brindado para la realización del programa experimental, por su valioso aporte y asesoramiento en las tareas de dosificación y elaboración del hormigón, así como también por brindar todo el equipamiento necesario para la puesta a punto y ejecución de los ensayos.

.Referencias:

- [1] Leonhardt, F. (1990). Estructuras de hormigón armado. Bases para el armado de estructuras de hormigón armado. Tomo III, Springer-Verlag.
- [2] CIRSOC 201-2005 (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado.
- [3] ACI-318 (2014). Building code requirements for structural concrete.
- [4] CEB-FIB. Model code for concrete structures 2010. *Document Competence Center Siegmund Kastl eK, Germany*, páginas. 1–432, 2010. doi:10.1002/9783433604090.
- [5] Nayed, S., Zaki, W., Rabie, M. (2019). Effect of reinforcement on punching shear behavior of flat slabs. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)* 10, 2, pp.2403–2418.
- [6] Gouveia, N., Fernandes, N., Faria, D., Ramos, A., Lúcio, V. (2014). SFRC flat slabs punching behaviour – Experimental research. *Composites: Part B, Vol. 63*, pp. 161–171.

Organiza:

- [7] Teixeira, M., Barros, J., Cunha, V., Moraes-Neto, B., Gouveia A. (2015). Numerical simulation of the punching shear behaviour of self-compacting fibre reinforced flat slabs. *Construction and Building Materials* .74 pp. 25–36
- [8] Faconi, L., Plizzari, G., Minelli, F. (2018). Elevated slabs made of hybrid reinforced concrete: Proposal of a new design approach in flexure. *Structural Concrete*. Pp. 1-16. DOI: 10.1002/suco.201700278.
- [9] Nassif, N., Altoubat, S., Maalej, M., Estephane, P. (2020). Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Flat Slabs with Macro Synthetic Fibers. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 856 012001. doi:10.1088/1757-899X/856/1/012001.
- [10] Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., Aguado, A. (2014). Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Experimental investigation and numerical simulation. *Construction and Building Materials* 57. pp. 92–104.
- [11] Ruano G. (2013). Refuerzo de elementos estructurales de hormigón con hormigón reforzado con fibras, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- [12] Narayanan R, Darwish IYS. (1987). Punching shear tests on steel-fibre-reinforced micro-concrete slabs. *Mag Concr Res* 1987; 39 (138), pp. 42–50.
- [13] Harajli, M., Maalouf, D., Khatib, H. (1995). Effect of Fibers on the Punching Shear Strength of Slab-Column Connections. *Cement & Concrete Composites* 17. pp 161 – 170.
- [14] Liu, H., Xiang T., Zhao R., (2009). Research on non-linear structural behaviors of prestressed concrete beams made of high strength and steel fiber reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 23, pp. 85–95.
- [15] Chalioris, C., Karayannis, C. (2009). Effectiveness of the use of steel fibres on the torsional behaviour of flanged concrete beams. *Cement & Concrete Composites*, 31 , pp. 331–341.
- [16] Campione G., Mangiavillano M., (2008). Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations. *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 2970–2980.
- [17] Perez Fiengo, 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, Argentina.
- [18] IRAM-1546 (2013). Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión.
- [19] IRAM 1658 (1995). Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral.
- [20] González, F. (2023). Análisis de la eficiencia del uso de fibras híbridas como refuerzo del hormigón. Aplicación a tubos de drenaje. Tesis doctoral. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay.

Organiza:

- [21] Akcay, B. & Tasdemir, M. A. (2012). Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 287–293.
- [22] Deng, F., Ding, X., Chi, Y., Xu, L., Wang, L. (2018). The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: experimental study and analytical modelling. *Composite Structures*, 206, pp. 693-712.
- [23] Li, Z., Mobasher, B., & Shah, S. P. (1991). Characterization of interfacial properties in fiber-reinforced cementitious composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 74(9), pp. 2156–2164.
- [24] González, F., & Rougier, V. (2022). Análisis experimental del comportamiento mecánico de tubos de hormigón reforzado con fibras híbridas. *Informes de la Construcción*, 74(565), pp. 432-432.
- [25] Oller S., Lubliner, J., J. Oliver, and E. Oñate, “A Plastic-Damage Model for Concrete,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 25, pp. 299–329, 1989.
- [26] Oller S. Modelos constitutivos. Curso sobre métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería. UPC, España, 1996.
- [27] Ferrado, F., Escalante, M., Rougier (2023). Estudio numérico probabilístico de la capacidad resistente de tubos de HRFA con distribución aleatoria de fibras. *Informes de la Construcción*, 74 (568). Instituto Torrojas ISSN:0020-0883.

Organiza: