

SIMULACION NUMERICA DEL COMPORTAMIENTO A PUNZONADO DE LOSAS DE HORMIGON ARMADO REFORZADO CON FIBRAS

NUMERICAL SIMULATION OF THE PUNCHING SHEAR BEHAVIOR OF FIBER- REINFORCED CONCRETE SLABS

Viviana C. Rougier^{a,b}, Miqueas C. Denardi^{a,b}, Federico A. Gonzalez^a y Facundo A.
Retamal^a

^aUniversidad Tecnológica Nacional, Fac. Reg. C del U, Grupo de Investigación de
Mecánica Computacional y de Estructuras. Entre Ríos, Argentina,
rougierv@frcu.utn.edu.ar, <https://www.frcu.utn.edu.ar>

^bUniversidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia. Entre Ríos,
Argentina, mdenardi@frcon.utn.edu.ar, <https://www.frcon.utn.edu.ar>

Palabras clave: Punzonado, Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, Simulación numérica.

Resumen. La falla por punzonamiento de losas de hormigón armado es un tipo de falla frágil que ocurre con una importante reducción de la capacidad portante. Por ello, para mejorar la resistencia al punzonado puede recurrirse, entre otras estrategias, al uso hormigones reforzados con fibras. En este trabajo se presenta la simulación numérica de ensayos de punzonado de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero. Para representar el comportamiento en régimen no lineal del hormigón se adoptó un modelo de daño y plasticidad acoplados y en el caso del hormigón reforzado con fibras se consideró a las mismas aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón. El problema se resolvió mediante un código de elementos finitos no lineal. Los resultados obtenidos se compararon con datos experimentales y predicciones analíticas de modelos existentes. Finalmente se realizó un estudio paramétrico tomando como variables la resistencia del hormigón, la dosificación y orientación de las fibras.

Keywords: Punching, Steel Fiber Reinforced Concrete, Numerical simulation.

Abstract. Punching failure in reinforced concrete slabs is a brittle mechanism that causes a considerable loss of load capacity. Therefore, to improve punching shear strength, one possible strategy is the use of fiber-reinforced concrete, among others. Numerical simulation of punching tests carried out on steel fiber reinforced concrete slabs is presented in this work. To represent the nonlinear behavior of concrete, a coupled damage-plasticity model was adopted. For fiber reinforced concrete, steel fibers were considered as discrete elements randomly distributed within the concrete matrix. The problem was solved using a nonlinear finite element code. The obtained results were compared with experimental data and analytical predictions from existing models. Finally, a parametric study was conducted, taking concrete strength, fiber dosage and orientation as variables.

1 INTRODUCCIÓN

Los entrepisos sin vigas son sistemas de losas armadas en dos direcciones que se apoyan directamente sobre las columnas sin interposición de vigas. La resistencia a flexión de este sistema estructural puede lograrse con espesores de losa relativamente pequeños. Sin embargo, para evitar la falla frágil por punzonamiento se requieren medidas de diseño específicas pues una vez que ocurre, la capacidad portante del sistema disminuye bruscamente, pudiendo provocar el colapso estructural parcial o completo.

Según diferentes estudios ([Gouveia et al., 2014](#); [Gouveia et al., 2018](#); [Musse et al., 2018](#)) el comportamiento a punzonado puede mejorarse mediante la incorporación de fibras discretas al hormigón, particularmente de acero (FA) pues se logra retrasar el proceso de fisuración bajo carga creciente, y con ello, una mejora de la tenacidad del material y de la capacidad resistente a corte ([Mari et al., 2020](#); [Mari y Spinella, 2023](#)). Cuando se utiliza un refuerzo combinado, es decir, barras de refuerzo y fibras discretas, las fibras incrementan la resistencia al corte y la capacidad de deformación, mientras que las barras de acero garantizan el refuerzo a flexión.

En este trabajo se estudia numéricamente el comportamiento a punzonado de losas de hormigón armado reforzado con fibras de acero (LHARFA), sin ningún tipo de refuerzo a corte y según dos dosificaciones de fibras, 20 y 50 kg/ m³. El estudio se centra en la determinación de la carga crítica de punzonamiento, en el análisis de los modos de falla e influencia del volumen de fibras incorporadas. Para representar el comportamiento del hormigón en régimen no lineal se adopta un modelo de daño plástico disponible en el software comercial ABAQUS ([License keys - LKO2847182 - for Dassault Systèmes software licencia otorgada a la Universidad Tecnológica Nacional](#)), en tanto las fibras se consideran discretas y aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón. Los resultados obtenidos se compararon y analizaron con predicciones analíticas de modelos existentes ([Narayanan y Darwish, 1987](#); [Harajli et al., 1995](#)) y con datos de una campaña experimental en la cual se construyeron y ensayaron prototipos a escala de losas de hormigón armado sin fibras y con dos dosificaciones de FA, 20 y 50 kg/ m³. Finalmente, se realizó un estudio paramétrico adoptando como variables la resistencia del hormigón, la fracción de volumen de fibras y su orientación. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de dichos parámetros en la respuesta estructural de las losas.

2 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL Y MODELOS MATERIALES

A fin de modelar el comportamiento no lineal de losas hormigón armado (HA) sin refuerzo de fibras, y losas de hormigón armado reforzado con dos dosajes de FA, se utilizó el programa de elementos finitos ABAQUS ([ABAQUS, 2017](#)). 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.

2.1 Modelo constitutivo del hormigón

Para modelar el comportamiento del hormigón armado existen diferentes enfoques y modelos constitutivos que caracterizan su comportamiento. Uno de los aspectos que 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 ([Oller et al., 1989](#); [Oller, 1996](#)), disponible en la librería de ABAQUS ([ABAQUS, 2017](#)) (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, excentricidad de flujo potencial, relación de tensiones (compresión equibiaxial inicial dividida por la compresión uniaxial inicial), relación del segundo invariante de tensión sobre el meridiano de tracción y la viscosidad fueron adoptados de acuerdo a la documentación ABAQUS (ABAQUS, 2017).

2.1.1 Comportamiento a compresión uniaxial del hormigón

El comportamiento a compresión uniaxial 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 (2010). En la Figura 1a se muestra la curva a compresión uniaxial adoptada en el modelo, donde f_{cm} es la resistencia media a compresión del hormigón, ϵ_{c1} es la deformación correspondiente a la máxima tensión uniaxial de compresión, E_{c1} es el módulo secante desde el origen hasta la tensión pico de compresión. El modelo del CEF-FIB (2010) es válido para deformaciones menores que $\epsilon_{c,lim}$ (deformación última), ver Fig.1a. Para deformaciones mayores a $\epsilon_{c,lim}$, la rama descendente del diagrama tensión-deformación puede ser aproximada por una línea recta (CEF-FIB,2010).

2.1.2 Comportamiento a compresión uniaxial del hormigón

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 (2010), según Ec. (1). 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 área. EL valor de G_f se calculó de acuerdo al CEF-FIB (2010), ver Ecs. (2). Para definir la relación tensión-apertura de fisura se consideró la aproximación bilineal propuesta por el CEF-FIB (2010), dada en la Ecs. (3) y (4). En la Figura 1 b se muestra la curva adoptada en el modelo.

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} \quad (1)$$

$$G_f = 0.0073 \cdot f_{cm}^{0.18}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad (2)$$

Donde f_{cm} es la resistencia media a compresión del hormigón, f_{ck} su resistencia característica y Δf es un valor constante que puede adoptarse igual a 8 MPa.

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} \left(1.0 - 0.8 \frac{w}{w_1} \right) \text{ para } w \leq w_1 \quad (3)$$

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} \left(0.25 - 0.05 \frac{w}{w_1} \right) \text{ para } w_1 < w < w_c \quad (4)$$

Donde σ_{ct} es la resistencia a tracción del hormigón, f_{ctm} es la resistencia media a tracción del hormigón, w es la apertura de fisura en mm con: $w_1 = G_f$ cuando $\sigma_{ct} = 0,2 \cdot f_{ctm}$; y $w_c = 5 \cdot G_f$ cuando $\sigma_{ct} = 0$.

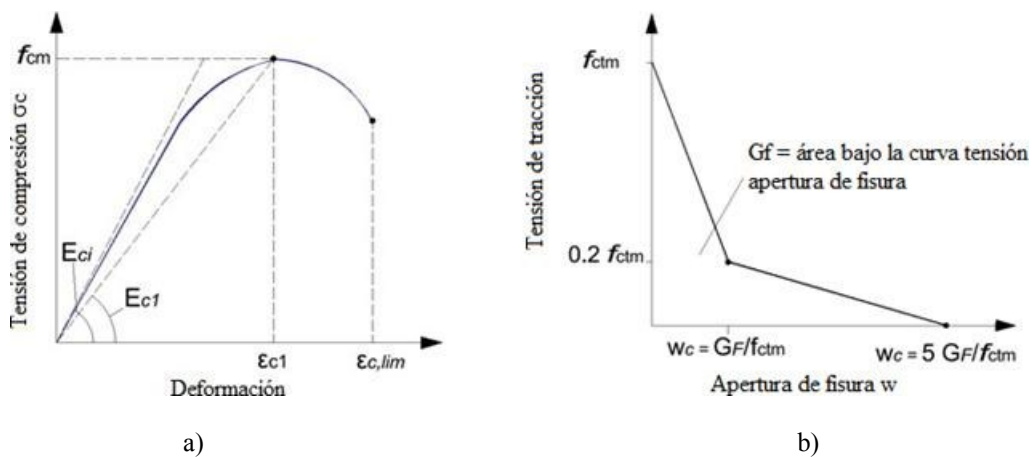


Figura 1. Curvas de comportamiento a compresión y tracción uniaxiales: a) Compresión uniaxial; b) tracción uniaxial, CEF-FIB (2010).

2.2 Fibras

Las fibras se modelaron discretas y aleatoriamente distribuidas en la masa de hormigón. Para ello, se adoptó un algoritmo desarrollado por Ferrado et al. (2023) que requiere como parámetros de entrada el número de fibras en la losa, las características geométricas de las fibras y también las de la losa.

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 2a 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 et al. (2023) 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 (ABAQUS, 2017). La figura 2b muestra un ejemplo de la nube de fibras generada por dicho algoritmo.

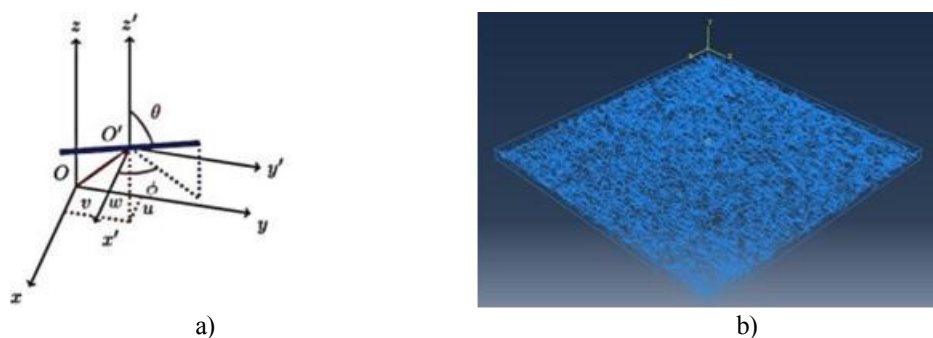


Figura 2. Nube de fibras con distribución y orientación aleatoria: a) parámetros de ubicación en el espacio de las fibras (Ferrado et al, 2024); b) Distribución aleatoria de fibras de acero en la losa.

2.3 Acero de refuerzo a flexión

Para modelar el comportamiento del acero de refuerzo, en tracción y en compresión, se utilizó el modelo propuesto por el CEF-FIB (2010) que se muestra en la Figura 3. Se trata de una curva bilineal con endurecimiento, donde los parámetros requeridos son el módulo

elástico (E_s), la tensión de fluencia (f_{yk}) y la resistencia máxima (f_{uk}) del acero, así como también la deformación específica correspondiente a dicha tensión (ϵ_{uk}).

El comportamiento de la interfaz entre el hormigón y las barras de acero de refuerzo fue modelado utilizando la condición embebido (embedded) pues no se observaron fallas por adherencia entre el acero y los diferentes tipos de hormigones empleados (ABAQUS, 2017).

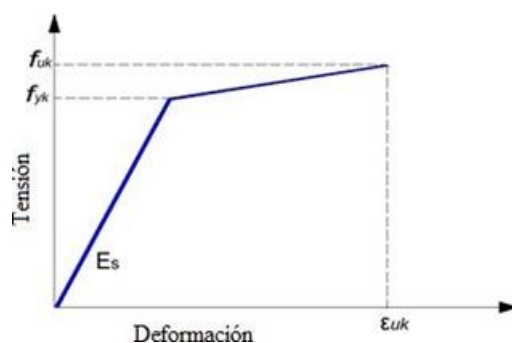


Figura 3. Curva de comportamiento del acero de refuerzo a flexión (CEB-FIB, 2010).

3 SIMULACIÓN DEL ENSAYO A PUNZONADO DE LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO Y DE LHRFA

Con la finalidad de estudiar el punzonamiento se generaron modelos de losas de HA sin fibras y de LHRFA partir de 6 especímenes ensayados en el patio de cargas de la empresa COINAR SRL. Las dimensiones de las losas fueron las mismas para todos los especímenes (1.5 m x 1.5 m x 0.06 m). Para la armadura de flexión se emplearon barras ϕ del 10 mm cada 200 mm en ambas direcciones, de acero de Dureza Natural Acindar, modulo elástico $E = 210000$ MPa y tensión de fluencia $f_{yk} = 420$ MPa. No se colocó en ningún caso armadura de corte. Se construyeron 2 losas (especímenes de control) de hormigón armado sin fibras, 2 especímenes de hormigón armado con una dosificación de 20 kg/m^3 (0,25 %) de FA, 2 losas de hormigón armado con 50 kg/m^3 (0,64 %) de FA. Las dosificaciones de FA se adoptaron teniendo en cuenta investigaciones de Gouveia et al. (2014). En la Figura 4 se muestran los detalles de armadura y sección de una losa de hormigón armado. En la Tabla 1 se resumen la denominación, características y propiedades mecánicas de los especímenes ensayados. En la Tabla 2 se presentan las características geométricas de las fibras y propiedades mecánicas.

En el ensayo experimental, las losas fueron posicionadas sobre un marco de acero diseñado al efecto (Figura 5a). Se midió la carga aplicada sobre una superficie central de 100×100 mm (Figura 5b). 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 ($100 \times 100 \times 20$ mm) entre el pistón y la parte superior de la losa para asegurar un contacto completo con la superficie de carga.

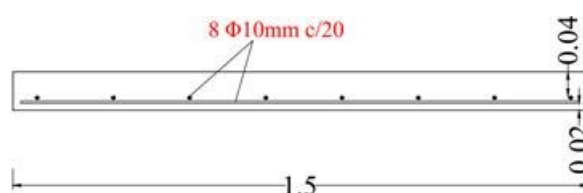


Figura 4. Dimensiones de losa y detalle del refuerzo hormigón armado (unidades en m).

Denominación	Características	f'_m (MPa)	E_c (MPa)
L1HA, L2HA	Losas de H°A° (de control)	35	27805
L3HARFA20, L4HARFA20	Losas de H° A° reforzado con 20 kg/m ³ de FA	35,15	27865
L5HARFA50, L6HARFA50	Losas de H° A° reforzado con 50 kg/m ³ de FA	36,60	28434

Tabla 1: Detalle de las losas con su denominación, características y propiedades mecánicas.

Fibra	Dimensiones			Características mecánicas	
	Diámetro D (mm)	Longitud L (mm)	Relación de aspecto L/D	Tensión de rotura (MPa)	Módulo (GPa)
Wirand FF1	1	50	50	1100	210

Tabla 2: Dimensiones y características mecánicas de las fibras empleadas.

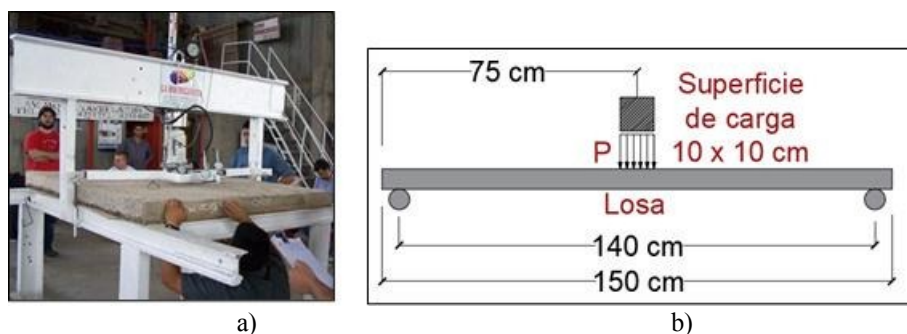


Figura 5. Esquema de ensayo e instrumentación: a) disposición de un espécimen y equipo de medición de carga; b) esquema de implementación de carga.

En la Figura 6 se pueden ver la malla de elementos finitos, las condiciones de borde y en la misma imagen la distribución aleatoria de fibras y la armadura de flexión correspondientes a una losa de H°A° reforzado 50 kg/m³ de FA. El modelo del ensayo a punzonado consistió en una placa de carga de acero superior y los prototipos de losa simplemente apoyados en todos sus bordes. La carga fue aplicada como un desplazamiento vertical controlado en la placa superior. La 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 consideraron 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 fue 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. En la Tabla 3 se pueden ver los parámetros del modelo de daño plástico del hormigón (ABAQUS, 2017), donde E_c es el módulo elástico del hormigón ($4700 f'_c{}^{1/2}$), μ el coeficiente de Poisson, ψ , el ángulo de dilatancia, EFP, la excentricidad de flujo potencial, f_{bo}/f_{co} la relación de tensiones (compresión equibiaxial inicial/compresión uniaxial inicial), K_c , la relación del segundo invariante de tensión sobre el meridiano de tracción y v la viscosidad. Para el modelo bilineal del acero, se adoptaron $E_s = 210$ GPa, $f_{yk} = 420$ MPa, $f_{uk} = 500$ MPa, $\epsilon_{uk} = 0.25$ y $\mu = 0.3$ (CEF-FIB, 2010).

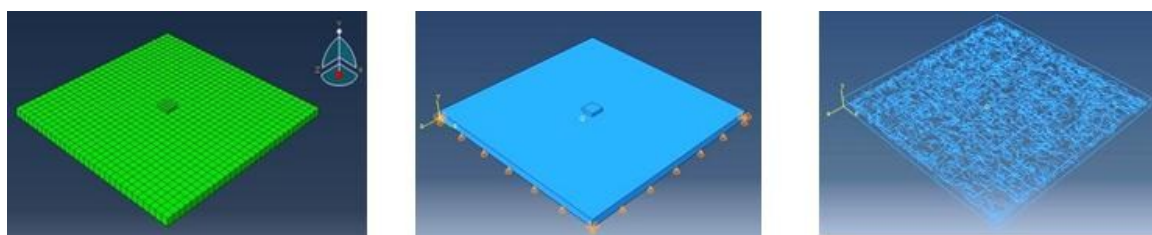


Figura 6. Malla de elementos finitos, condiciones de borde y distribución aleatoria de fibras para una losa de HRFA con 50 kg/m³.

E_c (MPa)	f'_c (MPa)	μ	ψ	EFP	f_{bo}/f_{co}	Kc	ν
25742	30	0.2	38	0.1	1.16	0.6667	0.001

Tabla 3: Parámetros del modelo de daño plástico del modelo (ABAQUS, 2017)

4 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 4 se comparan los valores promedio de resistencia última a punzonado, V_u , obtenidos numéricamente través del modelo presentado en la sección anterior, con los valores experimentales correspondientes a los diferentes especímenes analizados. También se muestran en la misma Tabla los resultados obtenidos con los modelos teóricos de [Narayanan y Darwish \(1987\)](#) (N y D) y de [Harajli et al. \(1995\)](#) (H et al.), el error relativo porcentual (ERP) entre los valores numéricos y experimentales y entre estos últimos y los teóricos. Al comparar los resultados numéricos y experimentales, se observa que para los prototipos, LHARFA20 y LHARF50 las diferencias porcentuales son del 10.37 % y del 2.52 %, respectivamente. En ambos casos sobreestiman los resultados experimentales. En el caso de las losas de HA la diferencia es mayor, y el valor experimental promedio resulta subestimado. Los modelos teóricos, en cambio, subestiman lo valores promedio experimentales con un ERP máximo de - 15.38 % para el modelo de [Narayanan y Darwish \(1987\)](#) y las LHA y un mínimo de - 0.38 % para el modelo [Harajli et al. \(1995\)](#) y las LHA. En general, se puede ver que el modelo de [Harajli et al. \(1995\)](#) aproxima mejor los resultados experimentales tanto de las losas de H°A° como de los especímenes de HARFA.

	Prototipos		
V_u (kN)	L1HA, L2HA	L3HARFA20, L4HARFA20	L5HARFA50, L6HARFA50
Valores Numéricos	41.20	58.50	61
Valores Exp.	Prom.(47 y 57)= 52	Prom.(52 y 54) = 53	Prom.(54 y 65.20) = 59.60
ERP (Num. y Exp.)	-20.77	10.37	2.52
Modelo de N y D	44	49.12	54.75
ERP (NyD y Exp.)	-15.38	-7.32	-8.14
Modelo de H et al.	51.80	51.26	55.33
ERP (H et al. y Exp.)	-0.38	-3.28	-7.16

Tabla 4: Cargas de punzonamiento numéricas, experimentales y teóricas.

5 ESTUDIO PARAMÉTRICO

En esta sección se describe un estudio paramétrico que tiene en cuenta las siguientes variables: resistencia del hormigón, fracción de volumen y orientación de las FA. El objetivo del estudio es determinar, comparativamente, cuál de estos parámetros tiene mayor

preponderancia en el comportamiento mecánico de losas de hormigón armado reforzado con FA sometidas a carga de punzonamiento.

5.1 Resistencia a compresión del hormigón f'_c

Se consideraron cuatro resistencias a la compresión: 20 MPa (H20), 25 MPa (H25), 35 MPa (H35) y 40 MPa (H40). Las resistencias mencionadas son las empleadas comúnmente en la región para la elaboración de losas en entrepisos sin vigas. Las características de las fibras y de la armadura de flexión no se modificaron. Se adoptó un dosaje de 50 kg/m^3 de FA, teniendo en cuenta que los resultados experimentales, mostraron una mayor resistencia a punzonamiento (V_u) para dicha fracción de volumen. La clase H30 si bien fue utilizada para la modelación de los resultados experimentales, se la consideró igualmente en este estudio a los efectos de comparación. En la Figura 7a se muestran los distintos valores de V_u para las resistencias mencionadas y además se agrega el resultado obtenido experimentalmente. Se observa que el incremento de la resistencia de la matriz de hormigón genera un aumento importante de la resistencia a punzonado. Con respecto al H30, el incremento de V_u fue de 7.92 % para un H35 y de aproximadamente 13.12 % para un H40.

5.2 Volumen de fibras

Se consideraron tres fracciones de volumen de fibras de acero: 25 kg/m^3 ($\approx 0.30 \%$), 40 kg/m^3 ($\approx 0.50 \%$), 60 kg/m^3 (0.75%) y 80 kg/m^3 (1%). Estos valores fueron adoptados teniendo en cuenta el trabajo de [Gouveia et al., \(2014\)](#) y el manual técnico de Maccaferri ([Sarzialejo et al.](#)). Las características de las fibras y de la armadura de flexión no se modificaron con respecto a los datos experimentales. Se adoptó una resistencia a la compresión del hormigón de 30 MPa. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Figura 7b, donde además se agregaron los valores experimentales de los especímenes LHARFA-20 y LHARFA-50. Se observa un ligero incremento en la capacidad de carga, con el aumento del volumen de fibras. Dicho aumento no resultó el esperado, sin embargo experimentalmente el aumento del volumen de fibras, dificulta la trabajabilidad de la mezcla. Por otro lado, se debe destacar que para volúmenes altos de fibras (80 y 60 kg/m^3) el costo computacional, en cuanto a tiempos, fue significativo.

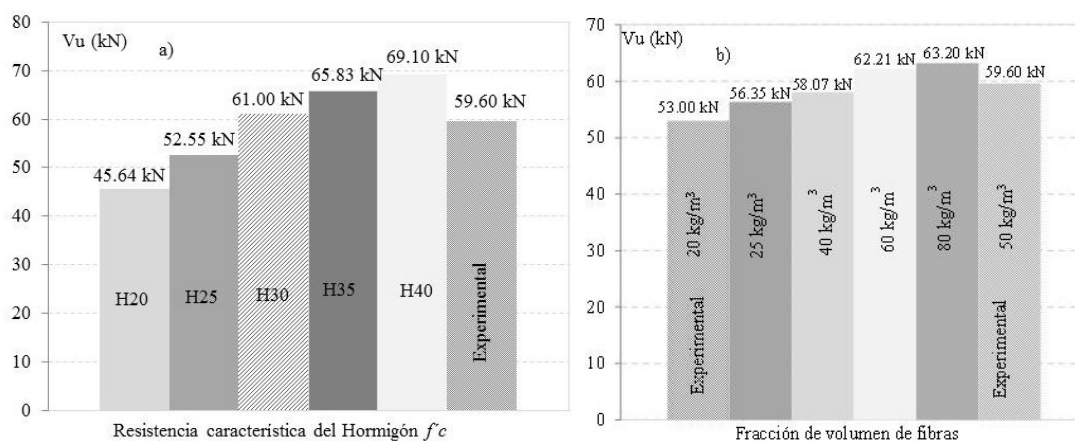


Figura 7. Resistencia a punzonado en función de: a) la resistencia característica del hormigón de una losa de H°A° reforzado 50 kg/m^3 de fibras de acero, b) la fracción de volumen de FA.

5.3 Orientación de las fibras

Se analizaron tres casos de orientación de fibras: fibras orientadas en la dirección x (Figura

8a), fibras orientadas en la dirección y (Figura 8b) y fibras orientadas en el plano x-y (Figura 8c). Las características de las fibras y de la armadura de flexión no se modifican con respecto al estudio experimental, al igual que el volumen de fibras, 50 kg/m^3 . En la Figura 8 d, se puede ver la comparación de las diferentes orientaciones, incluyendo la aleatoria y los resultados experimentales de una losa LHARFA50. Se observa que la orientación ideal, es decir la que reportaría mayor capacidad resistente a punzonado, es la que corresponde a todas las fibras orientadas en la dirección x, situación muy poco probable. Luego seguiría la orientación aleatoria y por último la que corresponde al plano x-y. En términos de porcentajes y comparando con el valor promedio experimental de V_u , la orientación aleatoria se ubica un 2,35 % por encima de dicho valor, y exactamente igual pero por debajo (-2.35 %) si las fibras se orientan en el plano x-y.

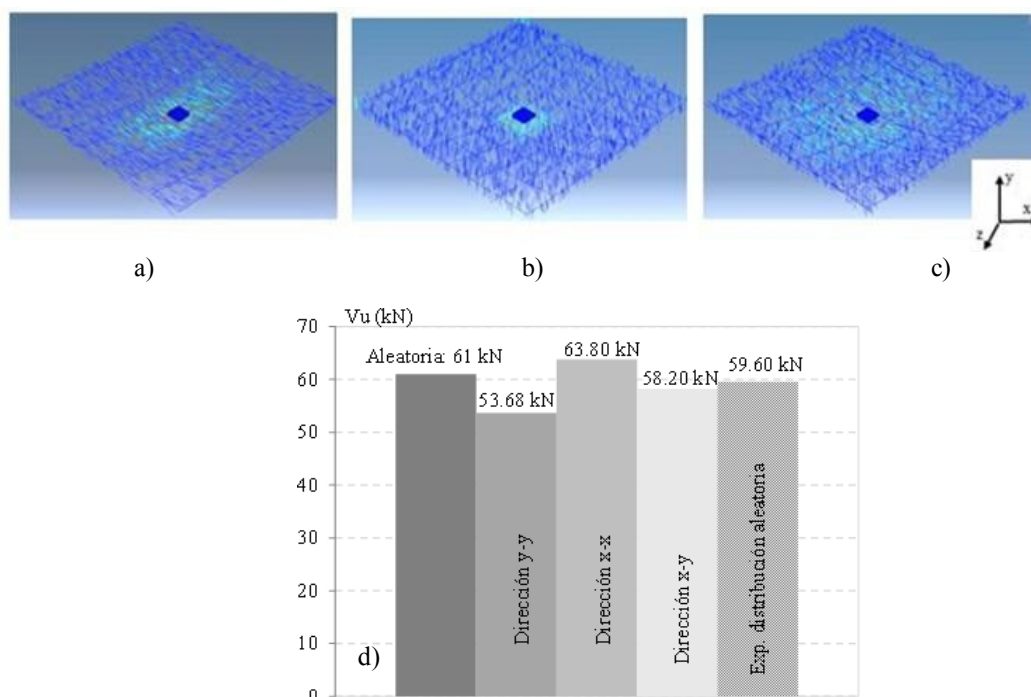


Figura 8. LHARFA (50 kg/m^3) con nube de fibras orientadas en distintas direcciones: a) eje x, b) eje y y c) plano x-y, d) comparación diferentes orientaciones

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado resultados numéricos de ensayos de punzonamiento, realizados en losas de hormigón armado con refuerzo de FA, sin ningún tipo de refuerzo a corte y la comparación con valores experimentales y teóricos. El trabajo se complementó con un estudio paramétrico donde se analizaron tres variables, resistencia del hormigón, fracción de volumen de fibras y orientación de las mismas. Aun cuando es necesaria la ejecución de un mayor número de ensayos, del análisis de dichos resultados se puede decir lo siguiente:

El modelo numérico mostró una sobreestimación de la resistencia última a punzonado para los dos volúmenes de fibras de acero utilizadas, 20 kg/m^3 y 50 kg/m^3 . 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. El modelo tampoco considera el efecto pared y el efecto vibrado, que según investigaciones de [Torrijos et al. \(2016\)](#) influyen en la distribución y orientación de las fibras y por lo tanto en densidad de las mismas en el

elemento estructural. La densidad de fibras influye a su vez en el comportamiento residual de los hormigones reforzados con fibras.

Los modelos teóricos analizados para evaluar la resistencia última a punzonado de las losas de hormigón armado sin fibras y de aquellas de HRFA dieron resultados aceptables. El mejor ajuste con respecto a los valores experimentales, se observó con el modelo de Harajli et al. (1995), para las losas de H^oA^o sin fibras y reforzadas con 20 y 50 kg/m³ de FA.

Del estudio paramétrico se puede decir, que el parámetro más influyente en la capacidad resistente a punzonado fue el incremento de la resistencia de la matriz de hormigón, en comparación con el aumento del volumen de fibras y la orientación de las mismas.

REFERENCIAS

- ABAQUS User's Manual. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2017.
- American Concrete Institute, ACI 318. *Building code requirements for structural concrete*, 2014.
- CEB-FIB. Model code for concrete structures 2010. *Document Competence Center Siegmund Kastl eK, Germany*, 1–432, 2010. <http://doi:10.1002/9783433604090>.
- CIRSOC 201. *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado*, 2005.
- 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, 2023. <https://doi.org/10.3989/ic.90428>
- Gouveia, N., Fernandes, N., Faria, D., Ramos, A., Lúcio, V., *SFRC flat slabs punching behaviour – Experimental research*. Composites: Part B, 63: 161–171, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.005>
- Gouveia, N., Lapi, M., Orlando, M., Faria, D., Ramos, A., *Experimental and theoretical evaluation of punching strength of steel fiber reinforced concrete slabs*. Structural Concrete, 19:217–229, 2018. <https://doi.org/10.1002/suco.201700136>
- Harajli, M., Maalouf, D., Khatib, H., *Effect of Fibers on the Punching Shear Strength of Slab-Column Connections*. Cement & Concrete Composites, 17: 161 – 170, 1995. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(94\)00031-S](https://doi.org/10.1016/0958-9465(94)00031-S)
- Musse, T., Liberati, E., Trautwein, L., Gomes, R., Guimaraes, G., *Punching shear in concrete reinforced flat slabs with steel fibers and shear reinforcement*. Ibracon Structures and Materials Journal, 11: 1110 – 1121, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500011>
- Mari, A., Spinella, N., *Mechanical model for the shear-punching strength of steel fiber reinforced concrete slabs under concentric loading*. Structures, 52:854–867, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.035>
- Narayanan R., Darwish I., *Punching shear tests on steel-fibre-reinforced micro-concrete slabs*. Magazine of Concrete Research, 39: 42–50, 1987. [doi:10.1088/1757-899X/246/1/012025](https://doi.org/10.1088/1757-899X/246/1/012025)
- Oller, S., Lubliner, J., Oliver, J., Oñate, E., *A Plastic-Damage Model for Concrete*. International Journal of Solids and Structures, 25: 299–329, 1989.
- Oller, S., *Modelos constitutivos. Curso sobre métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería*. UPC, España, 1996.
- Sarzaejo, A., Rossi, B., Perri, G., Winterberg, R., Aristeguieta, R., *Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón*. I Técnico, Maccaferri.
- Torrijos, M., Giaccio, G., Zerbino, R.; *Orientación del refuerzo y anisotropía en hormigones con fibras*. VII Congreso Internacional - 21ª Reunión Técnica de la AATH, Salta, 2016.