

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MÉNSULAS CORTAS DE HORMIGÓN ARMADO CON Y SIN LA ADICIÓN DE FIBRAS DE ACERO

Córdova Gómez, Eleyser^a; Etienot, Sebastián^a; Folino, Paula^{a,b}
Ing. Civil; Mag. Ing. Civil; Dra. Ing. Civil

^a *Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Métodos numéricos en ingeniería (LMNI). Buenos Aires, Argentina*

^b *Instituto (UBA-CONICET) de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería "Hilario Fernández Long" (INTECIN). Buenos Aires, Argentina*
ecordova.ext@fi.uba.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar experimentalmente el comportamiento mecánico y de falla de ménsulas cortas de Hormigón Armado, considerando como parámetros la ubicación de la carga, la cuantía de armadura horizontal y si el hormigón es con o sin fibras. En el caso de hormigón armado con fibras, se consideró un material con macro fibras de acero con un contenido en volumen del 0.75%. Los resultados obtenidos en base al ensayo mecánico de dieciséis ménsulas cortas con distintas configuraciones muestran que la adición de fibras de acero mejora el comportamiento de falla, aportando ductilidad y preservando la integridad estructural. También, en términos generales, permiten un incremento de la capacidad portante a flexión y corte, así como a corte rasante. Sin embargo, se concluyó que la adición de fibras, al menos en el contenido analizado, no son adecuadas para ser utilizadas en reemplazo total de la armadura horizontal típica.

ABSTRACT

The aim of this work is to experimentally evaluate the mechanical and failure behavior of Reinforced Concrete corbels, considering the load position, the horizontal reinforcement ratio, and the use of concrete with or without fibers as parameters. In the case of fiber-reinforced concrete, a material incorporating steel macro-fibers with a volume fraction of 0.75% was considered. The results obtained from the mechanical testing of sixteen corbels with different configurations show that the addition of steel fibers improves the failure behavior, providing ductility and preserving structural integrity. Also, in general terms, they allow for an increase in the flexural and shear load-bearing capacity, as well as the shear friction capacity. However, it was concluded that the addition of fibers, at least at the analyzed volume fraction, is not suitable to be used as a total replacement for the typical horizontal reinforcement.

INTRODUCCIÓN

Las ménsulas cortas son elementos estructurales de gran utilidad para conectar elementos de una estructura, típicamente en uniones viga-columna o viga-viga, y se caracterizan por ser elementos tipo viga en voladizo con cuya principal característica es poseer una relación menor o igual a la unidad entre la longitud (medida desde el punto de aplicación de la carga hasta la cara de la columna) y su altura efectiva. Debido a esta geometría, en estas vigas se origina un estado de tensiones biaxial que impide el cumplimiento de la hipótesis de Bernoulli¹, clasificándose de este modo como regiones “D” o de discontinuidad.

Estas zonas se caracterizan por presentar diversos modos de falla complejos. Estudios previos los han clasificado detalladamente, identificando fallas por tracción por flexión, tracción diagonal, corte rasante, pérdida de anclaje, aplastamiento de la biela comprimida y deficiencias de armado en la zona de aplicación de la carga^{2,3,4}. La naturaleza de los flujos de fuerzas en estas áreas de discontinuidad dificulta notablemente su análisis conceptual y de diseño.

Si bien existen numerosas investigaciones y métodos aplicables para la conexión viga-columna tradicional, los estudios enfocados en la inclusión de fibras de refuerzo siguen siendo limitados. Adicionalmente, en la práctica profesional, al diseñar no siempre se considera que el armado en estas zonas suele ser altamente congestionado. Esta problemática genera severas dificultades constructivas en la etapa de obra, lo que en ocasiones obliga a tomar decisiones improvisadas que pueden alterar negativamente el comportamiento estructural del nudo y comprometer la integridad global de la estructura.

Por otra parte, el uso de hormigones de alta resistencia en la industria ha incrementado significativamente en los últimos años. Sin embargo, el aumento de la resistencia mecánica conlleva un incremento inherente de la fragilidad del material. Para mitigar este fenómeno, se ha extendido el estudio de adiciones de fibras de distintos tipos; entre ellas, las fibras de acero son las que aportan el mayor beneficio en el comportamiento estructural, ya que incrementan sustancialmente la resistencia a la tracción y la ductilidad⁵. Asimismo, este refuerzo optimiza el comportamiento pospico y eleva la resistencia al corte del material⁶.

En el campo específico de las ménsulas cortas, diversos investigadores han desarrollado campañas experimentales empleando hormigones de resistencia normal y de alta resistencia reforzadas con fibras de acero. Sus conclusiones señalan que la adición de estas fibras, al igual que el uso de estribos, mejora de forma significativa la capacidad portante a flexión, corte y ductilidad en las ménsulas^{7,8,9}. En cuanto a los mecanismos de rotura, se observó que en el caso de hormigones de resistencia normal predomina la falla por corte; no obstante, al incorporar fibras de acero en fracciones de volumen del 1% al 2%, el modo de falla se transforma predominantemente hacia un mecanismo de falla flexional^{8,10}. Por el contrario, en ménsulas de hormigón de alta resistencia, la adición de fibras en contenidos volumétricos del 0.5%, 1% y 1.5% no alteró significativamente el modo de falla original^{9,11}.

A partir de estos antecedentes, surge el interés por evaluar el desempeño de ménsulas cortas utilizando hormigón autocompactante (SCC, *Self-Compacting*

Concrete) y hormigón autocompactante reforzado con fibras (SCFRC, *Self-Compacting Fiber Reinforced Concrete*) en regiones "D". Como se mencionó, estas zonas son inherentemente susceptibles a fallas múltiples debido a sus discontinuidades geométricas y mecánicas. En este contexto, la presente investigación aborda el estudio experimental de ménsulas cortas a escala real con el propósito de cuantificar y comparar el aporte de las fibras de acero. Para ello, se emplean dosificaciones de hormigón cuyo comportamiento mecánico ha sido objeto de estudios previos en el Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería (LMNI) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA).

En este trabajo se exponen y discuten los resultados del comportamiento mecánico y los patrones de falla de ménsulas cortas de hormigón armado, fabricadas con y sin fibras de acero, bajo distintas configuraciones de cuantías de armadura. Por motivos prácticos asociados a la configuración de los ensayos, las probetas se diseñaron como especímenes de doble ménsula para aprovechar la simetría estructural que ofrecen. Los resultados se compararon evaluando la variación de la relación luz de corte-altura efectiva (entre 0.45 y 0.67), analizando tanto especímenes equipados únicamente con refuerzo longitudinal principal, como especímenes que combinan dicho refuerzo con armadura complementaria transversal de estribos.

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Con el propósito de investigar el comportamiento mecánico y los mecanismos de falla descritos, se fabricaron dieciséis ménsulas cortas de hormigón armado, dosificadas con y sin fibras de acero bajo diferentes configuraciones de armadura, para ser sometidas a ensayos bajo cargas en distintas ubicaciones. Adicionalmente, se moldearon especímenes cilíndricos y prismáticos destinados a la caracterización mecánica de ambas matrices cementicias.

Los hormigones empleados fueron elaborados con cemento CP40 (470 kg/m^3), escoria de alto horno (177 kg/m^3), arena fina silíceas (268 kg/m^3), arena granítica triturada (480 kg/m^3) y agregado grueso granítico 6-12 mm (748 kg/m^3); con una relación agua/binder (binder = cemento + escoria) de 0.32 y un contenido de aditivo reductor del agua de mezclado de alto rango de 3.4 kg/m^3 . Mientras que para obtener el SCFRC se agregó un contenido en volumen de fibras de acero tipo hook-end del 0.75% (60 kg/m^3) de 33 mm y 0.75 mm de longitud y diámetro respectivamente.

Los especímenes tipo ménsula consistieron en una sección de columna de 15 cm x 15 cm con ménsulas cortas simétricas con proyección de 20 cm, un ancho de 15 cm, alturas de 25 cm y 12.5 cm en la cara de la columna y el borde externo, respectivamente. Con respecto a las armaduras, un grupo de ocho especímenes se armó con dos barras de 12 mm ($2\Phi 12 \text{ mm}$) como armadura principal (A_{sc}) y con tres barras de 6 mm ($3\Phi 6 \text{ mm}$) como estribos cerrados (A_h); mientras que, los otros ocho especímenes se armaron solo con dos barras de 12 mm ($2\Phi 12 \text{ mm}$), como se muestra en las Figura 1.

La distribución y codificación de las dieciséis ménsulas se detalla en la Tabla 1, disponiéndose de dos especímenes idénticos por cada grupo para asegurar la representatividad de los ensayos. La nomenclatura adoptada responde al formato para las matrices sin adición de fibras, y para los hormigones reforzados con el 0.75%

en volumen de macrofibras de acero (60 kg/m^3). Específicamente, las designaciones G1 y G2 corresponden a las ménsulas equipadas únicamente con refuerzo principal (A_{sc}), mientras que G3 y G4 identifican a aquellas que incorporan tanto la armadura principal como los estribos horizontales (A_h). En síntesis, las variables de estudio analizadas comprenden: la relación luz de corte-altura efectiva (a_v/d), la presencia de armadura transversal complementaria (estribos cerrados) y la incorporación de fibras de acero.

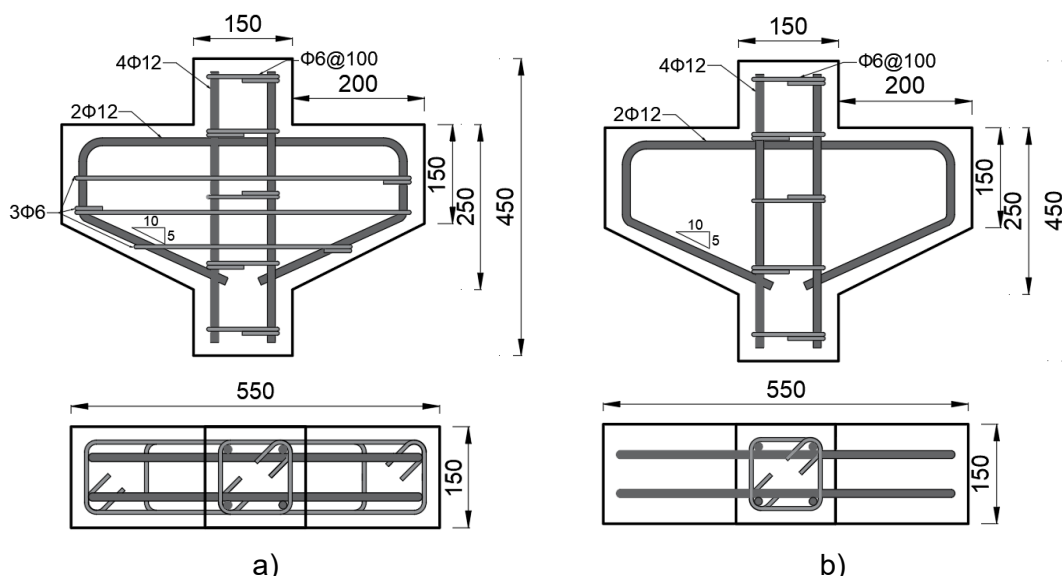


Figura 1. a) Ménsula con armadura principal (A_{sc}) y estribos (A_h), b) Ménsula con armadura principal (A_{sc})

Grupo	Espécimen N.º	Contenido de Fibra de Acero % (kg)	Armadura principal (A_{sc})	Estribos (A_h)	a_v/d
G1-0	M01-SCC	-	2Φ12 mm	-	0.45
	M02-SCC				
G2-0	M03-SCC			3Φ6 mm	0.67
	M04-SCC				
G3-0	M05-SCC			3Φ6 mm	0.45
	M06-SCC				
G4-0	M07-SCC			-	0.67
	M08-SCC				
G1-0.75	M09-SCFRC	0.75% (60 Kg)	2Φ12 mm	-	0.45
	M10-SCFRC				
G2-0.75	M11-SCFRC			3Φ6 mm	0.67
	M12-SCFRC				
G3-0.75	M13-SCFRC			3Φ6 mm	0.45
	M14-SCFRC				
G4-0.75	M15-SCFRC			3Φ6 mm	0.67
	M16-SCFRC				

Tabla 1 - Configuración de especímenes

Para la caracterización de los hormigones SCC y SCFRC, se moldearon especímenes cilíndricos de 100x200 mm (diámetro y altura respectivamente) para ensayos de compresión uniaxial (UC) y compresión diametral (ST). Asimismo, se elaboraron especímenes prismáticos de 150 x 150 x 600 mm (ancho, alto y largo) a los cuales se les realizó una entalla de 25 mm en el punto medio, para ensayo de flexión a tres puntos (TPB). Los ensayos de estos especímenes se realizaron en una prensa GCTS modelo RTX-2000 con una capacidad máxima de 2000 kN, operada mediante control de desplazamiento axial a una velocidad de 0.004 mm/s para ensayos UC y 0.002 mm/s para ST. En el caso de los ensayos de flexión (TPB), el control se ejecutó basándose en la apertura de la boca de la fisura (CMOD), aplicando una velocidad de 0.05 mm/min hasta alcanzar un CMOD de 0.25 mm, y de 0.20 mm/min hasta finalizar el ensayo en un CMOD de 3.50 mm.

Las ménsulas se ensayaron en forma vertical mediante la aplicación de una carga P en la sección de columna generando cargas concentradas $P/2$ en cada apoyo (uno en cada proyección de las ménsulas) como se muestra en la Figura 2. Los apoyos se posicionaron a distancias de 10 cm y 15 cm de la cara de la columna para obtener una relación $a_v/d=0.45$ y $a_v/d=0.67$ respectivamente (ver Tabla 1). Los ensayos de especímenes de ménsula corta se realizaron en un pórtico de carga de marca Baldwin con una capacidad de carga 90 tn (Figura 3), mediante control por desplazamiento axial a una velocidad constante 0.5 mm/min. El registro continuo de la carga y de los desplazamientos se realizó mediante una celda de carga HBM tipo C3H3 de 100 toneladas y un transductor LVDT de tipo flecha con un rango máximo de 10 cm, ambos conectados a un sistema de adquisición de datos HBM QuantumX MX840B, como se muestra en la Figura 3.

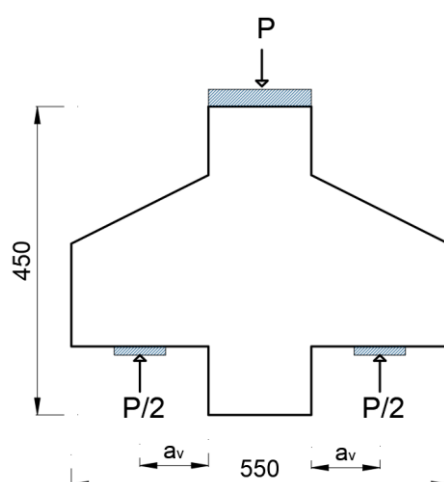


Figura 2. Esquema de ensayo



Figura 3. Ménsula en pórtico de carga

RESULTADOS

Caracterización del hormigón

En la Tabla 2 se resumen los resultados medios (promedio de tres especímenes) de los ensayos de caracterización del hormigón empleado: UC, ST, y TPB.

Ensayo	Espécimen	Variable	Unidad	SCC	SCFRC
UC	Cilindro 100x200	f'_c	[MPa]	57.44	55.29
		ε_0	[%]	0.231	0.261
		E	[MPa]	38742	33038
ST	Cilindro 100x200	f_{st}^1	[MPa]	-	4.73
		f_{st}^2	[MPa]	-	8.2
TPB	Prisma 150x150x600	f_{t-TPB}	[MPa]	-	5.89
		f_L^{FL}	[MPa]	-	4.45
		$f_{R,1}^{CMOD=0.50}$	[MPa]	-	5.56
		$f_{R,2}^{CMOD=1.50}$	[MPa]	-	5.66
		$f_{R,3}^{CMOD=2.50}$	[MPa]	-	5.03
Resistencia a la compresión uniaxial (f'_c), deformación unitaria axil pico (ε_0), módulo de Young (E), 1º y 2º tensión pico (f_{st}^1 y f_{st}^2), tensión pico TPB (f_{t-TPB}), tensión límite proporcional (f_L^{FL}), tensiones residuales para CMOD 0.5, 1.5 y 2.5 ($f_{R,1}^{CMOD=0.50,1.5,2.5}$)					

Tabla 2 - Resultados medios de caracterización del SCC y SCFRC

A partir de los resultados obtenidos para el ensayo de compresión uniaxial (UC), se observa para el SCFRC una leve disminución en la resistencia a la compresión (f'_c) de aproximadamente un 4%, acompañada de una reducción del 14.7% en el módulo de elasticidad (E) respecto del SCC. No obstante, la incorporación de las fibras indujo un incremento del 13% en la deformación unitaria axial asociada a la carga de pico (ε_0), lo que evidencia una mejora en la capacidad de deformación del material antes de alcanzar su resistencia máxima.

Por otra parte, en el ensayo de flexión (TPB), el comportamiento del SCFRC exhibió una marcada estabilidad en sus tensiones residuales, manteniendo valores cercanos a la tensión del límite de proporcionalidad, lo que manifiesta el efecto de "cosido" de las fibras y una respuesta con ablandamiento controlado o cuasi-endurecimiento por flexión.

Comportamiento mecánico

En la Tabla 3 se muestran los resultados de cargas pico de las ménsulas cortas en un lado de la ménsula (P/2) y los resultados medios para cada grupo evaluado. Estos resultados muestran que los grupos con $a_v/d = 0.45$ (G1 y G3) obtuvieron mayores resistencias en carga pico que los grupos con $a_v/d = 0.67$ (G2 y G4), lo que muestra que para relaciones a_v/d menores, es decir con carga aplicada más cercana a la cara de la columna, se obtienen resistencias mayores.

Grupo	Espécimen Nº	A_s	A_h	a_v/d	P/2 (KN)	P/2 _{medio} (KN)
G1-0	M01-SCC	2Φ12 mm	-	0.45	305.09	263.29
	M02-SCC				221.49	
G2-0	M03-SCC			0.67	203.69	201.36
	M04-SCC				199.03	
G3-0	M05-SCC		3Φ6 mm	0.45	358.73	358.26
	M06-SCC				357.80	
G4-0	M07-SCC			0.67	225.65	237.96
	M08-SCC				250.27	
G1-0.75	M09- SCFRC	2Φ12 mm	-	0.45	407.57	365.69
	M10- SCFRC				323.82	
G2-0.75	M11- SCFRC			0.67	241.25	231.34
	M12- SCFRC				221.44	
G3-0.75	M13- SCFRC		3Φ6 mm	0.45	328.23	309.75
	M14- SCFRC				291.26	
G4-0.75	M15- SCFRC			0.67	302.74	294.33
	M16- SCFRC				285.92	

Tabla 3 - Resultados en carga pico en ménsulas cortas con SCC y SCFRC

Los resultados medios de carga pico de las ménsulas cortas de SCFRC respecto a las de SCC mostraron aumentos del 38.9%, 14.9% y 23.7%, en los grupos G1 (A_{sc} y ensayadas a 10 cm), G2 (A_{sc} y ensayadas a 15 cm) y G4 (A_{sc} , A_h y ensayadas a 15 cm), respectivamente. Sin embargo, el grupo G3 (ménsulas con A_{sc} , A_h y ensayadas a 10 cm) exhibió una reducción anómala del 13.5% en su capacidad portante media. Este comportamiento atípico se atribuyó a la ocurrencia de fallas locales prematuras por aplastamiento en la zona de apoyo, un fenómeno que impidió la formación y estabilización completa del puntal de compresión a lo largo de su directriz estructural.

La Figura 4 expone de forma comparativa los aportes relativos de los estribos horizontales, las fibras de acero y la acción combinada de ambos refuerzos, tomando como referencia base a las ménsulas armadas únicamente con armadura principal de tracción (G1-0 y G2-0). En el caso de los especímenes con estribos se obtuvo un aumento de la resistencia pico media del 36.1% y 18.2% (G3-0 y G4-0) para las relaciones a_v/d de 0.45 y 0.67 respectivamente, mientras que al adicionar fibras de acero se observaron incrementos del 38.9% y 14.9% (G1-0.75 y G2-0.75). Finalmente, al adicionar tanto fibras acero como estribos, el incremento fue del 17.6% y 46.17 % (G3-0.75 y G4-0.75).

La proximidad entre estos valores demuestra que el aporte a la resistencia máxima que provee una fracción volumétrica del 0.75% de macrofibras es mecánicamente comparable al beneficio estructural que proporciona la cuantía de estribos adoptada. Finalmente, al combinar ambos esquemas de refuerzo (fibras y estribos), la capacidad máxima se elevó un 17.6% para $a_v/d=0.45$ (pese al fallo prematuro mencionado) y un 46.2% para $a_v/d=0.67$. Esto último pone de manifiesto que el efecto sinérgico entre las fibras y la armadura transversal resulta más eficiente en configuraciones con geometrías de carga más alejadas de la cara del apoyo.

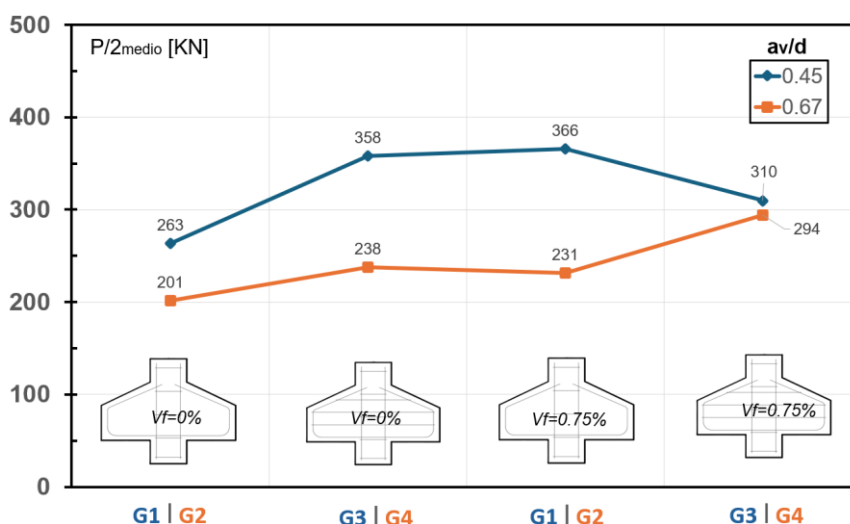


Figura 4. Resultados medios de carga pico

Las curvas de carga aplicada ($P/2$) en función del desplazamiento transversal (δ) se presentan en la Figura 5, donde se corrobora que la incorporación de fibras de acero no solo incrementa la carga máxima, sino que altera favorablemente la respuesta pospico del elemento. Al analizar las ménsulas sin armadura transversal (Figura 5b), se observa que la adición de fibras extiende significativamente la rama descendente,

induciendo mayores desplazamientos en el régimen plástico. En contraste, el uso de estribos en matrices convencionales (Figura 5a) aporta una rigidez inicial superior y un incremento nítido de la carga máxima, pero sin traducirse en una ganancia sustancial de la ductilidad pospico.

Por otra parte, las respuestas ilustradas en las Figuras 5c y 5d revelan que el mayor beneficio en términos de ductilidad y tenacidad se alcanza mediante el empleo simultáneo de estribos y macrofibras de acero. En estas configuraciones, los desplazamientos plásticos sostenidos resultaron marcadamente superiores a los registrados en los especímenes reforzados únicamente con fibras. La única excepción a esta tendencia de resistencia se aprecia en la Figura 5c para la relación $a_v/d=0.45$, donde el grupo reforzado con fibras y estribos desarrolló una capacidad inferior a su par equivalente sin fibras de acero, como consecuencia directa de las fallas locales prematuras por aplastamiento en la zona del nudo estructural descritas anteriormente.

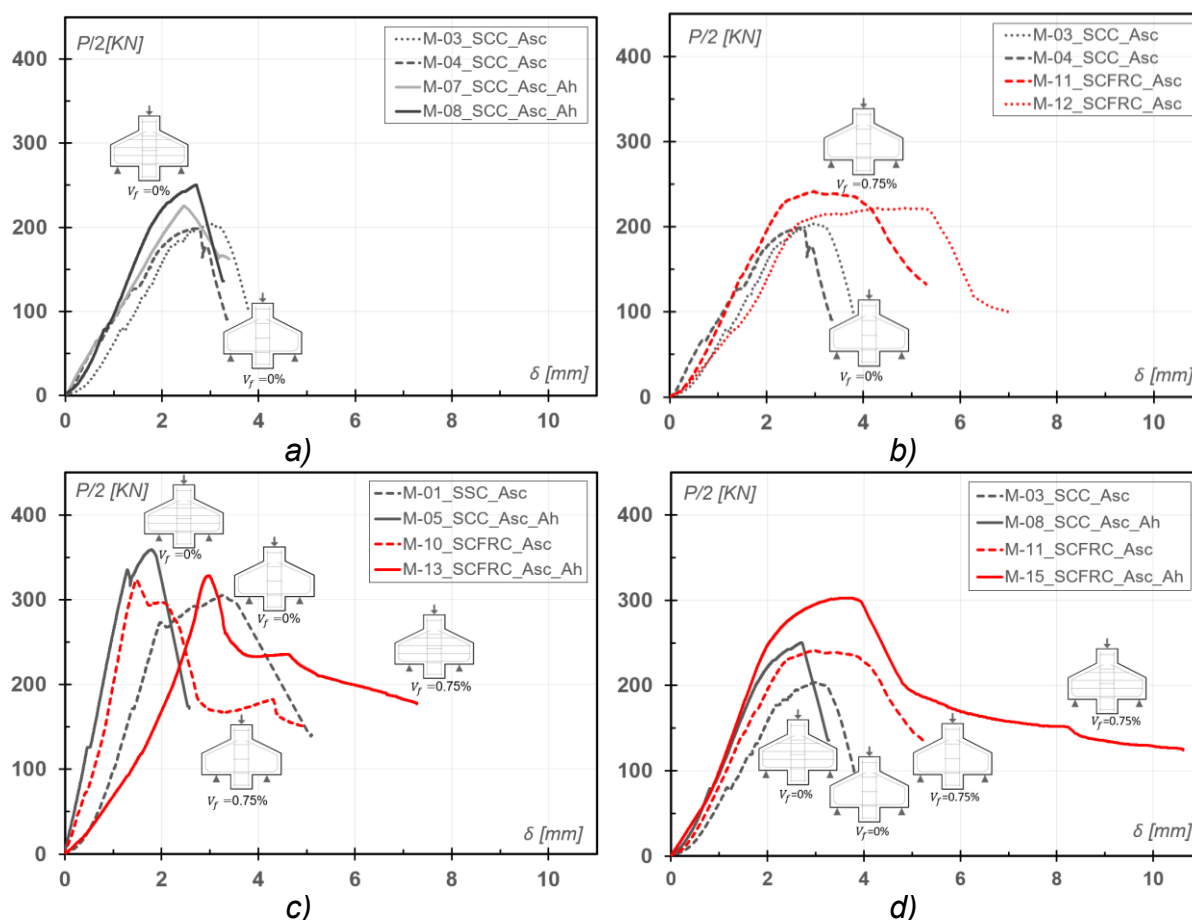


Figura 5 - Curvas de carga aplicada vs. desplazamiento: a) Ménsulas con SCC con estribos, b) Ménsulas con SCC y SCFRC sin estribos, c) Contenido volumétrico de fibras de acero para $a_v/d = 0.45$ y d) Contenido volumétrico de fibras de acero para $a_v/d = 0.67$

Modos de falla

En la Tabla 4 se detallan los modos de falla observados para ménsulas cortas con SCC y SCFRC, siendo predominantes los fallos de tracción diagonal y corte rasante.

Grupo	Esp. N.º	Contenido de Fibra de Acero % (kg)	A_{sc}	A_h	a_v/d	Modo de falla
G1-0	M01-RC	-	$2\Phi 12$ mm	-	0.45	Tracción diagonal
	M02- RC					Tracción diagonal
G2-0	M03- RC				0.67	Tracción diagonal
	M04- RC					Falla de anclaje
G3-0	M05- RC			$3\Phi 6$ mm	0.45	Corte rasante
	M06- RC					Tracción diagonal
G4-0	M07- RC				0.67	Corte rasante
	M08- RC					Corte rasante
G1-0.75	M09-FRC	0.75% (60 Kg)	$2\Phi 12$ mm	-	0.45	Tracción diagonal
	M10-FRC					Tracción diagonal
G2-0.75	M11-FRC				0.67	Tracción diagonal
	M12-FRC					Tracción diagonal
G3-0.75	M13-FRC			$3\Phi 6$ mm	0.45	Corte rasante
	M14-FRC					Corte rasante
G4-0.75	M15-FRC				0.67	Tracción diagonal
	M16-FRC					Tracción diagonal

Tabla 4 – Modos de falla en especímenes de ménsula corta

En las ménsulas cortas sin fibras (SCC), la rotura se produjo mayoritariamente por tracción diagonal. Este fenómeno se caracterizó por un escaso desarrollo previo de fisuras por flexión en la interfaz viga-columna y por la aparición, propagación y apertura repentina de una grieta oblicua principal alineada con la biela de compresión, lo que condujo a una falla de naturaleza frágil sin señales de aviso previas.

Por el contrario, en los especímenes de SCFRC, si bien el modo de falla final predominante continuó siendo la tracción diagonal, el proceso de fisuración se modificó sustancialmente. Estas probetas exhibieron una notable proliferación de fisuras por flexión estables antes de alcanzar la carga pico, combinada con un retraso en la aparición y una menor tasa de apertura de las fisuras inclinadas. Este comportamiento otorgó al elemento una capacidad de aviso previo a la rotura, manifestando una mayor ductilidad pospico gracias al mecanismo de transferencia de tensiones a través de las fisuras que proveen las fibras, en concordancia con las curvas presentadas en la Figura 5.

Al analizar en detalle los especímenes ensayados con $a_v/d=0.45$ (Figura 6), el grupo de referencia (G1-0), provisto únicamente de armadura principal, evidenció un patrón de fisuración extendido derivado de la fluencia del acero longitudinal de tracción, colapsando finalmente por tracción diagonal debido al aplastamiento del hormigón en el nudo superior (interfaz entre la cara inclinada de la ménsula y la columna). En contraposición, las ménsulas con estribos (G3-0) presentaron una menor densidad de fisuras generales pero un desarrollo más localizado de grietas inclinadas; su modo de rotura resultó disperso, registrándose un espécimen con falla por corte rasante y el otro por tracción diagonal sin aplastamiento del hormigón.

Por su parte, las ménsulas de SCFRC sin estribos (G1-0.75) exhibieron una baja tasa de fisuración diagonal general, priorizando el desarrollo y apertura controlada de fisuras de flexión hasta alcanzar la carga máxima, con un fallo final por tracción diagonal. Finalmente, el grupo combinado con fibras y estribos (G3-0.75) causó las fallas locales prematuras por aplastamiento en la zona del apoyo mencionadas en la sección anterior. Dichas concentraciones de tensiones locales impidieron el desarrollo de la capacidad resistente nominal de la sección crítica de la interfaz columna-ménsula, forzando de manera prematura un mecanismo de falla final por corte rasante.

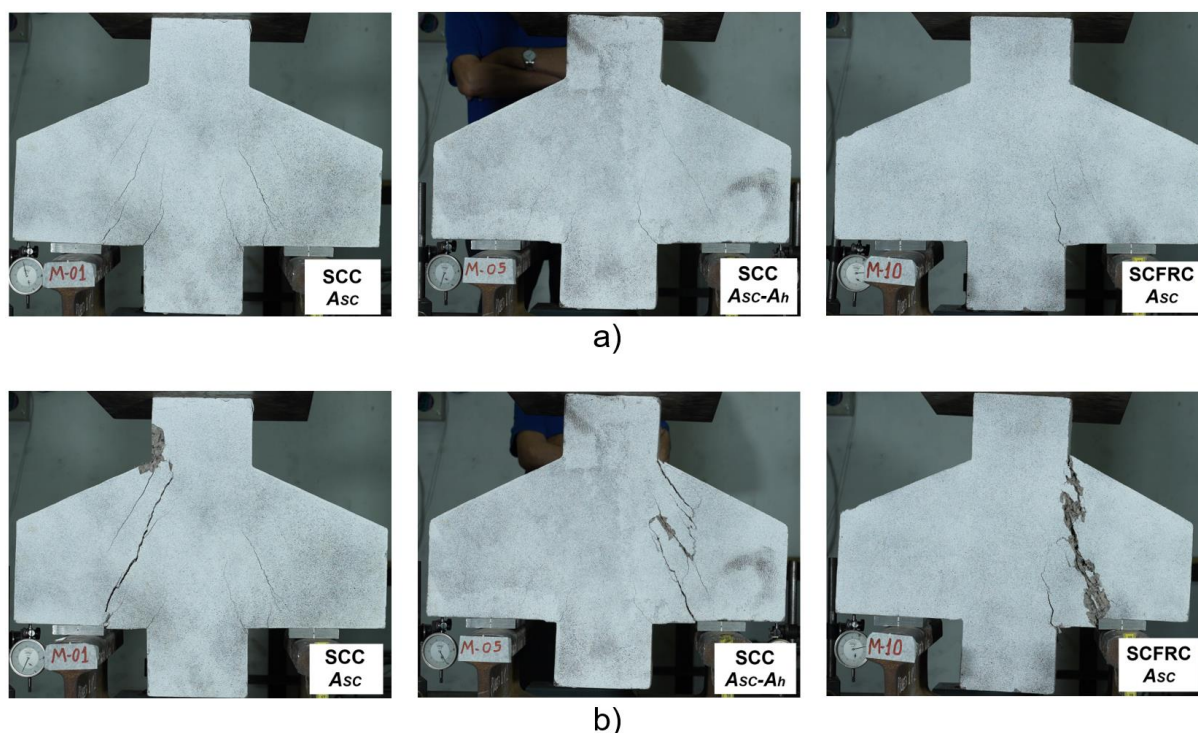


Figura 6 - Modos de falla: a) carga pico, b) carga última

Para el caso de las ménsulas con $a_v/d = 0.67$ (Figura 7), aquellas reforzadas solo con acero principal (G2-0) mostraron fisuración inclinada que se inició en la zona central del cuerpo de la ménsula y se propagó progresivamente hacia el punto de aplicación de la carga y el apoyo. La falla final se produjo por tracción diagonal combinada con un descalce o falla de anclaje de la armadura principal, acompañada del aplastamiento del hormigón en el vértice superior. Las probetas equipadas con estribos (G4-0) limitaron la proliferación de fisuras secundarias, pero concentraron el daño en planos oblicuos, derivando en fallas generalizadas por corte rasante y tracción diagonal.

No obstante, al incorporar fibras, tanto en las configuraciones sin estribos (G2-0.75) como con estribos (G4-0.75), se obtuvo una distribución de fisuras por flexión estables durante la etapa prepico. En la etapa pospico, las fibras controlaron eficazmente la tasa de propagación y el ancho de las grietas diagonales inclinadas, conduciendo a una rotura por tracción diagonal, como se ilustra en la Figura 7.

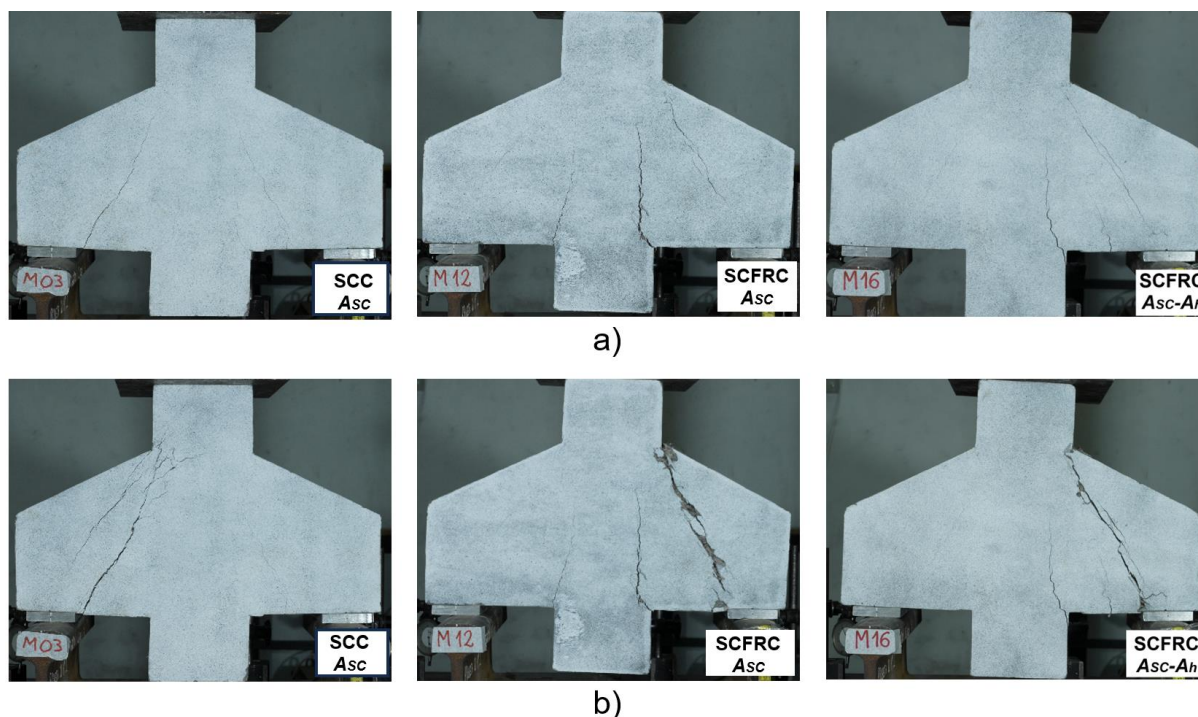


Figura 7 - Modos de falla: a) carga pico, b) carga ultima

CONCLUSIONES

A partir del estudio experimental desarrollado sobre el comportamiento mecánico y los mecanismos de colapso de ménsulas cortas de hormigón armado, elaboradas con SCC y SCFRC, se desprenden las siguientes conclusiones principales:

- La incorporación de macrofibras de acero aumentó tanto la resistencia máxima como la ductilidad de las ménsulas cortas. Este beneficio en la capacidad pospico resultó marcadamente superior en los especímenes ensayados con la carga concentrada más alejada de la cara de la columna ($a_v/d=0.67$).
- La adición de fibras también aportó incrementos en la carga pico media mecánicamente equiparables a los proporcionados por la cuantía de armadura transversal complementaria de estribos adoptada, destacándose además por otorgar una mejora ductilidad posflexión del elemento.
- Si bien la incorporación de fibras no alteró de forma generalizada el modo de falla final (predominantemente tracción diagonal), modificó sustancialmente la evolución del daño, promoviendo la apertura controlada de fisuras por flexión estables antes del nivel de carga máxima, retrasando la aparición de la grieta diagonal crítica. Esto dota a la estructura de una capacidad de aviso previo al colapso, mitigando la fragilidad característica del fallo por corte puro.
- Para las configuraciones geométricas analizadas, la presencia de fibras confinó eficazmente la matriz cementicia, permitiendo que el puntal de compresión desarrollara una mayor capacidad resistente. Este efecto evitó el desprendimiento y aplastamiento prematuro del hormigón en el nudo superior (interfaz cara inclinada-columna) observada en los especímenes sin estribos, manifestando una sinergia estructural aún más eficiente al combinarse simultáneamente con la armadura transversal de estribos.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Universidad de Buenos Aires por el apoyo financiero a través del Proyecto UBACyT 2023 No. 20020220100185BA. Asimismo, extienden su sincero agradecimiento a las empresas Peri y Maccaferri por su colaboración con materiales, a Humberto Bálzamo y Hernán Xargay por sus aportes en la dosificación de los hormigones, y a Franco Dios, Marcelo Net y Cristian Morris Tapia por sus contribuciones en la campaña experimental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cook W. D. and Mitchell D. (1988), "Studies of Disturbed Regions near Discontinuities in Reinforced Concrete Members", *ACI Structural Journal* 85 (2): pp 206-216.
- [2] Kriz, L., B., and C. H. Rath, (1965). "Connections in Precast Concrete Structures-Strength of Corbels." *Proceedings - Journal of The Prestressed Concrete Institute* (1): pp. 16-61.
- [3] Elzanaty, A. H., Nilson, A. H., & Slate, F. O. (1986, March). Shear capacity of reinforced concrete beams using high-strength concrete. In *Journal Proceedings* (Vol. 83, No. 2, pp. 290-296).
- [4] Wight, J. K., MacGregor, J. G. (2012). Reinforced concrete: Mechanics and design (6th ed.). Pearson.
- [5] Zerbino, R., Tobes, J. M., Bossio, M. E., & Giaccio, G. (2012). On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 191-200.
- [6] Folino, P., Ripani, M., Xargay, H., & Rocca, N. (2020). Comprehensive analysis of Fiber Reinforced Concrete beams with conventional reinforcement. *Engineering Structures*, 202, 109862.
- [7] Fattuhi, N. I., & Hughes, B. P. (1989). Ductility of reinforced concrete corbels containing either steel fibers or stirrups. *Structural Journal*, 86(6), 644-651.
- [8] Fattuhi, N. I. (1990). Strength of SFRC corbels subjected to vertical load. *Journal of Structural Engineering*, 116(3), 701-718.
- [9] Campione, G., La Mendola, L., & Mangiavillano, M. L. (2007). Steel fiber-reinforced concrete corbels: Experimental behavior and shear strength prediction. *ACI Structural Journal*, 104(5), 570.
- [10] Fattuhi, N. I. (1994). Strength of FRC corbels in flexure. *Journal of Structural Engineering*, 120(2), 360-377.
- [11] Li, S. S., Zheng, J. Y., Zhang, J. H., Li, H. M., Guo, G. Q., Chen, A. J., & Xie, W. (2023). Experimental Investigation on Shear Capacity of Steel-Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Corbels. *Materials*, 16(8), 3055.