



**Centro UC**  
Innovación del Hormigón

**REPORTE TÉCNICO**

# Capacidad a corte del hormigón liviano mediante ensayos de corte directo

Karla Patiño  
José Carlos Remesar  
Rosita Jünemann  
Hernán Santa María

**Julio 2024**

## **Licencia de descarga**

### **“Capacidad a corte del hormigón liviano mediante ensayos de corte directo”**

El Reporte Técnico “Capacidad a corte del hormigón liviano mediante ensayos de corte directo” (en adelante “Reporte Técnico”) fue creado por Karla Patiño, José Carlos Remesar, Rosita Jünemann y Hernán Santa María.

Los titulares del Reporte Técnico son la Pontificia Universidad Católica de Chile (UC), representada por el Centro de Innovación del Hormigón UC.

Se autoriza a los usuarios que acepten cumplir las condiciones de esta licencia, para que accedan a este Reporte Técnico bajo las condiciones que se señalan a continuación:

- 1.** Acceder gratuitamente al Reporte Técnico y reproducir una única copia con la sola finalidad de facilitar su lectura.
- 2.** Se prohíbe expresamente al usuario de este documento que adapte, modifique o traduzca, total o parcialmente el Reporte Técnico, sin autorización previa y expresa de los titulares.
- 3.** Se prohíbe la comunicación pública y su puesta a disposición por cualquier medio o procedimiento, así como la utilización del Reporte Técnico para otros fines distintos a los expresamente autorizados sin previo consentimiento por escrito de los titulares.
- 4.** Se prohíbe expresamente la distribución por cualquier medio del Reporte Técnico, ya sea, gratuita u onerosamente.

-©2024. Pontificia Universidad Católica de Chile, “Capacidad a corte del hormigón liviano mediante ensayos de corte directo”. Todos los derechos reservados.

## **Agradecimientos**

Este reporte se basa en el trabajo realizado por el primer autor como parte de sus estudios de doctorado en la Pontificia Universidad Católica de Chile, con la guía del segundo autor y bajo la supervisión del tercer y cuarto autor. La investigación recibió financiamiento a través de dos Fondos Semilla otorgado por el Centro de Innovación del Hormigón UC en 2022 y 2023. Los autores agradecen el apoyo de las empresas: MELÓN por la donación de cemento, y SIKA por la donación de aditivos. Por último, expresamos nuestro agradecimiento a los Departamentos de Ingeniería Estructural y Geotécnica, e Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile por facilitar los laboratorios necesarios para llevar a cabo el programa experimental.

# Capacidad a corte del hormigón liviano mediante ensayos de corte directo

**KARLA PATIÑO MORA**

Estudiante Doctorado Ingeniería UC

**JOSÉ CARLOS REMESAR**

Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica UC

**ROSITA JÜNEMANN**

Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica UC – Centro de Innovación del Hormigón UC

**HERNÁN SANTA MARÍA**

Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica UC – Centro de Innovación del Hormigón UC

---

## Resumen

El hormigón liviano es un material que ofrece ventajas significativas en la ingeniería estructural, principalmente por su baja densidad, lo cual lo convierte en una opción atractiva para reducir la masa de las estructuras y las demandas sísmicas. Por este motivo, es importante estudiar sus propiedades mecánicas en contraste con el hormigón convencional y así disminuir la incertidumbre al momento de diseño y modelado.

En este contexto, se propone una campaña experimental con especímenes de hormigón liviano y hormigón de peso normal, donde se compararon las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad y resistencia a la tracción por hendimiento, así como la resistencia al corte mediante un ensayo de corte directo. Se utilizó vidrio expandido como agregado ligero en las mezclas de hormigón liviano.

Los resultados señalan que tanto el módulo de elasticidad, la tracción por hendimiento y la resistencia al corte son

menores al hormigón de peso normal con resistencia a la compresión equivalente, en un 64, 33 y 55 por ciento respectivamente. Por otro lado, la ecuación de desempeño del ACI-318 subestima la capacidad a corte tanto del hormigón liviano como del hormigón de peso normal.

## 1. Introducción

El hormigón liviano (HL) es una opción viable al hormigón convencional de peso normal (HN) por sus diversas ventajas como baja densidad, buen aislamiento térmico, alta resistencia al fuego y durabilidad. Resulta una alternativa en la ingeniería para reducir la masa de la estructura y así reducir las demandas sísmicas. Sin embargo, es importante estudiar su comportamiento ante dichos eventos para conocer su capacidad. Esto puede ser estudiado analíticamente mediante modelos de elementos finitos o macromodelos, altamente utilizados en análisis no lineal de estructuras de hormigón reforzado.

Las propiedades mecánicas del hormigón juegan un papel importante para desarrollar técnicas de modelado eficaces que puedan predecir con precisión el comportamiento no lineal de elementos de hormigón armado. Sin embargo, la información disponible para el caso de HL en comparación con el HN es limitada y genera mayor incertidumbre por el tipo de agregado que se utiliza en las mezclas, ya que varios autores [1], [2], [3], [4] han destacado que tanto las propiedades de los agregados, la relación agua-cemento, la tasa de carga, el porcentaje de poros, la forma y la microestructura, influyen en las propiedades mecánicas del HL.

La mayoría de las disposiciones actuales de diseño de corte del HL se desarrollaron en la década de 1960. En aquella época, se descubrió que el HL tenía una menor resistencia al corte [5] y se relacionó con un factor de modificación  $\lambda$  para reducir su capacidad a corte con respecto al HN [6]. Esta menor resistencia al corte se debe a una menor resistencia a la rotura y al agrietamiento a través de los agregados, como se muestra en la Figura 1.

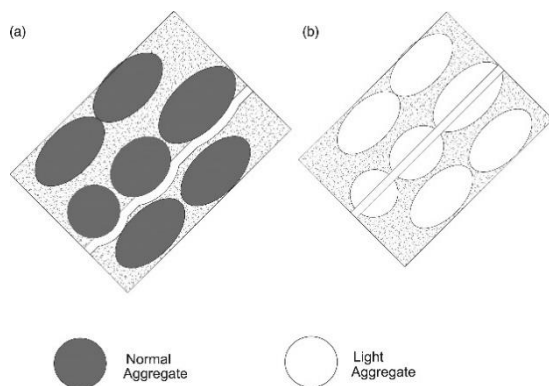


Figura 1. Agrietamiento de HN (a) y HL (b).

La resistencia al corte del hormigón generalmente ha sido determinada mediante ensayos de corte indirecto en vigas con o sin refuerzo transversal de corte. La resistencia en la cual aparecen grietas diagonales en la viga durante el ensayo se considera la resistencia al corte del hormigón [7]. Sin embargo, la razón por la que se dificulta predecir el corte en vigas se debe a varios factores como: (i) la variación en la deformación longitudinal a lo largo de la profundidad de las vigas y a lo largo de la longitud de las vigas, (ii) la armadura longitudinal generalmente no se distribuye de manera uniforme a lo largo de la profundidad de la viga, y (iii) los puntos de carga y apoyo crean un estado de esfuerzo más complejo [8].

Otra metodología para determinar la resistencia al corte del hormigón es mediante ensayos de corte directo. La Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE por sus siglas en inglés) introdujo una metodología para determinar la resistencia al corte del hormigón reforzado con fibras de acero [9]. En este ensayo la carga se aplica directamente en la dirección de corte sobre una superficie de ruptura predeterminada, lo que proporciona una medición más precisa de la resistencia al corte del material en esa dirección. Además, es más simple en comparación con el ensayo de corte indirecto.

Por lo tanto, este proyecto propone realizar una campaña experimental con especímenes de HL usando vidrio expandido, y especímenes análogos con HN con resistencias características a la compresión de 30 y 40 MPa. Las probetas serán sometidas a ensayo de corte directo. Los resultados experimentales permitirán: (i) comparar las resistencias a corte obtenidas entre hormigón liviano y hormigón de peso normal, (ii) comparar la

resistencia a corte obtenida con las ecuaciones analíticas propuestas por normativas de diseño, y (iii) evaluar la eficacia del factor de modificación  $\lambda$  propuesto por el ACI-318 para predecir la capacidad a corte del HL.

## 2. Programa experimental

El programa experimental tuvo dos etapas, la primera un ajuste de la dosificación en la pasta de cemento y la segunda comparar las propiedades mecánicas del hormigón liviano con las de un hormigón de peso normal.

### 2.1. Pastas de cemento

Se estudiaron tres pastas de cemento, que contenían los siguientes materiales:

- T38: metacaolín, ceniza volante, cemento, agua y superplastificante.
- C30: cemento, agua y superplastificante.
- M: metacaolín, cemento, agua y superplastificante.

Para la tercera pasta se usó distintas proporciones del metacaolín (ie. 10%, 20% y 30%). Se construyeron probetas cúbicas de 50x50x50mm como se puede observar en la Figura 2, que fueron ensayadas a compresión a 1, 7 y 28 días. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 1.



Figura 2. Pastas de cemento C30.

Pasta	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	R1 (MPa)	R7 (MPa)	R28 (MPa)
T38	2011.22	40.18	89.12	100.91
C30	2060.52	54.18	94.28	98.72
M10	2017.25	44.50	93.83	107.82
M20	1986.08	41.60	89.19	94.34
M30	2017.47	35.62	98.20	120.11

Tabla 1. Resistencia a la compresión de pastas de cemento.

### 2.2. Hormigón

Se diseñó mezclas de hormigón con resistencias de diseño de 30MPa y 40MPa, tanto para hormigón liviano como para hormigón de peso normal, cuyas dosificaciones por metro cúbico se resumen en la Tabla 2. El agregado liviano utilizado en este proyecto fue vidrio expandido, tamaño del agregado entre 0.1mm a 2mm, y con un porcentaje de absorción de 30% medido con todos los tamaños de agregado juntos.

No se logró reportar dosificaciones ni resultados de ensayos a las probetas de hormigón liviano con resistencia de diseño de 40MPa, ya que se produjo un problema de segregación como se puede observar en la Figura 3.



Figura 3. Segregación en las muestras HL40.

<b>Materiales</b>	<b>HL30</b>	<b>G30</b>	<b>G40</b>
Cemento	568	315	351
Metacaolín	155	-	-
Agua	256	223	212
Agregado liviano	240	-	-
Agregado de peso normal	-	1733	1733
Superplastificante	14.4	2.5	3.5
Estabilizador	6.4	1.5	-

Tabla 2. Proporciones de la mezcla de hormigón en kg por m<sup>3</sup>.

Las probetas fueron llenadas en 3 capas, y fueron consolidados solo los especímenes de hormigón de peso normal (G30), como se observa en la Figura 4(a). El desmoldaje se realizó a las 24 horas y se procedió a curar las muestras en piscinas de agua en una cámara de curado con temperatura controlada a 23°C como se puede observar en la Figura 4(b).



Figura 4 (a) llenado de probetas.



Figura 4 (b) curado.

### 2.3. Ensayo de corte directo

El programa experimental fue diseñado para caracterizar el comportamiento del corte directo del hormigón liviano. Para ello se construyó una viga con una sección cuadrada de 150mm de lado y 600mm de longitud.

Estas vigas deben estar ranuradas para inducir el plano de corte como se muestra en la Figura 5.

La profundidad de la ranura equivale a 1/10 de la altura de la probeta, así las vigas fueron ranuradas a 15mm de profundidad.



Figura 5. Probetas ranuradas.

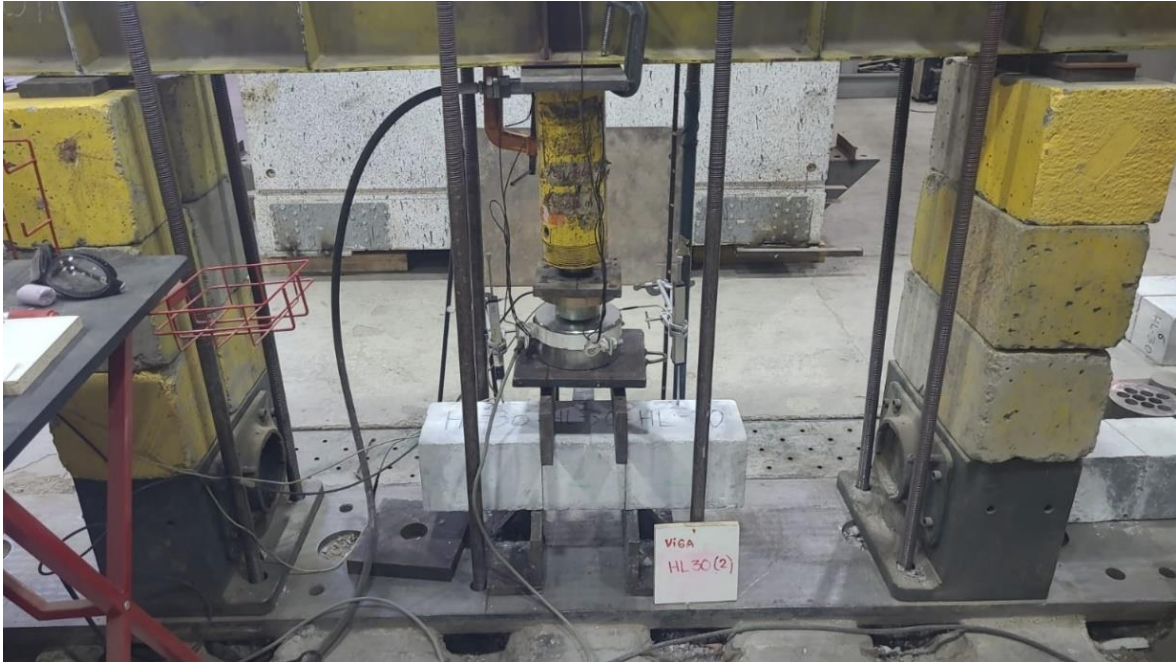


Figura 6. Instrumentación.

Se siguió la metodología JSCE-SF6 de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE por sus siglas en inglés). La prueba de corte directo se muestra en la Figura 6, donde la carga actúa perpendicularmente sobre la probeta en todo momento y se asienta en borde con un ancho especificado de  $H/10$ .

La capacidad a corte se determinó con la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{P}{2bh}$$

Donde:

$\tau$ : resistencia al corte [N/mm<sup>2</sup>]

$P$ : carga máxima obtenida [N]

$b$ : ancho de la viga [mm]

$h$ : alto de la viga [mm]

### 3. Resultados

#### 3.1. Propiedades mecánicas del hormigón

Las propiedades mecánicas del hormigón liviano y el hormigón de peso normal fueron medidas en laboratorio en estado de endurecimiento, después de cumplidos 28 días. Las propiedades mecánicas medidas fueron la resistencia a la compresión  $f'_c$ , el módulo de elasticidad  $E_c$ , y resistencia a la tracción por hendimiento  $f_t$ .

Los ensayos en las probetas de hormigón se realizaron con el apoyo del Centro de Innovación del Hormigón UC, y el Laboratorio de Materiales de Construcción del Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Chile.



ID	Edad (días)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	$f'_c$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
G30	32	2332	29.8	24906	2.06
G40	35	2295	35.5	25760	2.22
HL30	36	1324	34.7	11960	1.48

Tabla 3. Propiedades mecánicas del hormigón.

Para medir la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad se utilizaron 6 cilindros de 100mm de diámetro y 200mm de altura (3 cilindros HL30 y 3 cilindros G30) que fueron refrentadas antes de ser ensayadas.

Para medir la resistencia a la tracción por hendimiento se emplearon 6 cilindros de 150mm de diámetro y 300 mm de altura (3 por cada tipo de hormigón). Todas las probetas fueron sometidas a las mismas condiciones, ambientales y de curado.

Los ensayos se realizaron siguiendo las especificaciones dadas por ASTM C96, ASTM C469 y ASTM C496.

La densidad del hormigón liviano representa el 57% de la densidad del hormigón de peso normal. La resistencia a la compresión del hormigón liviano es semejante a G40 que es hormigón de peso normal, sin embargo, el módulo de elasticidad y resistencia a la tracción por hendimiento son menores en el caso del hormigón liviano, estas representan un 46% y 67% respectivamente del HN.

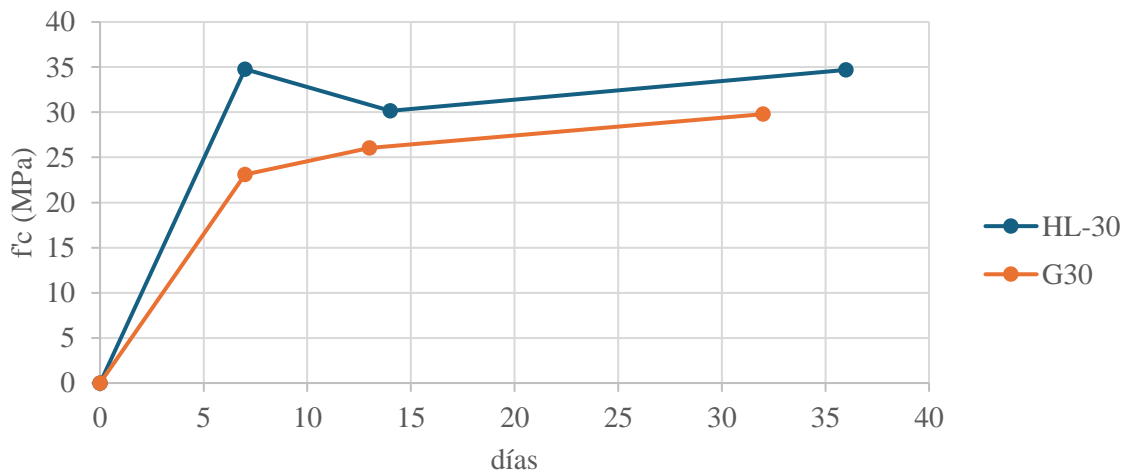


Figura 7. Resistencia a la compresión en el tiempo.

El código ACI-213 [10] indica que generalmente, se considera que el módulo de elasticidad del hormigón liviano varía entre el 50% y el 75% del módulo de elasticidad del hormigón de peso normal. Igualmente, señala que la resistencia a la tracción por hendimiento del hormigón liviano varía aproximadamente de un 70% a 100% de la del hormigón de referencia de peso normal cuando las comparaciones se hacen con la misma resistencia a la compresión. En este estudio, tanto el módulo de elasticidad como la resistencia a la tracción por hendimiento son ligeramente inferiores a los rangos mencionados por el código.

La Figura 7 muestra la resistencia a la compresión tanto del hormigón liviano como del hormigón del peso normal en el tiempo. Se puede observar que el hormigón liviano alcanza su resistencia máxima a temprana edad (7 días), a diferencia del hormigón de peso normal que alcanza su resistencia a la compresión luego de los 28 días.

### **3.2. Resistencia al corte directo**

Durante las pruebas de corte directo, la carga se aplicó continuamente hasta la falla, ocurriendo una falla repentina de las probetas en la mayoría de los casos en uno de los planos de corte, como se puede observar en la Figura 8.

Durante algunos ensayos se pudo observar la formación de fisuras fuera de los planos de corte como se observa en la Figura 9.



*Figura 8. Modo de falla en el ensayo de corte directo*



*Figura 9. Agrietamiento fuera del plano de corte.*

La Tabla 4 muestra la carga máxima aplicada, así como la capacidad a corte de cada probeta ensayada. Se puede observar que la resistencia a corte del hormigón liviano representa un 45% a la resistencia a corte del hormigón de peso normal, para una resistencia a la compresión similar.

ID	Carga (N)	$\tau$ (MPa)	V (N)
G40 - 1	168944	5.87	84472
G40 - 2	131996	4.58	65998
G40 - 3	136917	4.75	68459
G40 - 4	133873	4.65	66937
G40 - 5	161932	5.62	80966
G40 (promedio)		<b>5.09</b>	<b>73366</b>
HL30 - 1	67080	2.33	33540
HL30 - 2	72789	2.53	36395
HL30 - 3	69104	2.40	34552
HL30 - 4	57862	2.01	28931
HL30 (promedio)		<b>2.32</b>	<b>33354</b>

Tabla 4. Resistencia a corte experimental.

La resistencia nominal a corte del hormigón de acuerdo con el código ACI-318 (22.5.5.1.1) está dada por la siguiente ecuación:

$$V_c = 0.42\lambda\sqrt{f'_c}b_wd$$

Donde:

$V_c$ : resistencia nominal a la corte proporcionada por el hormigón.

$\lambda$ : factor de modificación para reflejar las propiedades mecánicas reducidas del hormigón liviano en relación con el hormigón de peso normal de la misma resistencia a la compresión.

$f'_c$ : resistencia a la compresión del hormigón.

$b_w$ : ancho de la sección

$d$ : altura de la sección

Para este caso en estudio se tomó un valor de  $\lambda = 0.75$  que se utiliza para casos en lo que se utiliza solamente agregado liviano.

En la Tabla 5 se muestran los resultados de resistencia al corte obtenidos con la ecuación propuesta por el código ACI-318.

ID	$\tau_c$ (MPa)	$V_c$ (N)
G40	2.50	36035
HL30	1.86	26720

Tabla 5. Resistencia nominal al corte.

Si comparamos los resultados obtenidos en la Tabla 4 y Tabla 5, se puede observar que los resultados experimentales son mayores a los obtenidos analíticamente tanto para hormigón de peso normal como para hormigón liviano.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se evaluó la resistencia al corte del hormigón liviano al utilizar agregado de vidrio expandido mediante ensayo de corte directo. Las principales conclusiones de los resultados experimentales son:

- La resistencia a la compresión del HL se alcanzó a temprana edad (7 días) a comparación del HN. Se redujo la densidad del hormigón liviano en un 43% a la del hormigón de peso normal.
- El módulo de elasticidad y resistencia a la tracción por

hendidimiento representan un 46% y 67%, respectivamente, del hormigón de peso normal al comparar con resistencia a la compresión equivalente.

- La resistencia a corte del hormigón liviano es equivalente a 45% la resistencia a corte del hormigón de peso normal, para una resistencia a la compresión similar.
- La resistencia a corte experimental, tanto para HL como HN fueron mayores a la resistencia a corte obtenida analíticamente.

## 5. Bibliografía

- [1] Y. Ke, A. L. Beaucour, S. Ortola, H. Dumontet, and R. Cabrillac, "Influence of volume fraction and characteristics of lightweight aggregates on the mechanical properties of concrete", *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 8, pp. 2821–2828, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.038
- [2] H. Z. Cui, T. Y. Lo, S. A. Memon, and W. Xu, "Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete," *Constr Build Mater*, vol. 35, pp. 149–158, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.053
- [3] M. A. Elrahman, S. Y. Chung, and D. Stephan, "Effect of different expanded aggregates on the properties of lightweight concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 71, no. 2, pp. 95–107, Jan. 2019, doi: 10.1680/jmacr.17.00465.
- [4] S. K. Adhikary and Z. Rudzionis, "Influence of expanded glass aggregate size, aerogel and binding materials volume on the properties of lightweight concrete," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2020, pp. 712–718. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.323.
- [5] D. L. Ivey and E. Buth, "Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams," 1967.
- [6] ACI 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)," *American Concrete Institute*, May 2019, doi: 10.14359/51716937.
- [7] M. N. S. Hadi, U. Sajjad, and M. N. Sheikh, "Simple Test Method for Determining Shear Strength of Concrete," *ACI Mater J*, vol. 119, no. 1, pp. 173–180, Jan. 2022, doi: 10.14359/51732986.
- [8] D. A. Kuchma, S. Wei, D. H. Sanders, A. Belarbi, and L. C. Novak, "Development of the one-way shear design provisions of ACI 318-19 for reinforced concrete," *ACI Struct J*, vol. 116, no. 4, pp. 285–295, 2019, doi: 10.14359/51716739.
- [9] JSCE-SF6, "Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete," Tokyo, 1990.
- [10] ACI 213R, "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete (ACI 213R-14)," *American Concrete Institute*, 2014.



**Centro UC**  
Innovación del Hormigón

[www.centrohormigon.uc.cl](http://www.centrohormigon.uc.cl)

[hormigon@uc.cl](mailto:hormigon@uc.cl)