

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE HORMIGÓN CELULAR ESPUMADO REFORZADO CON FIBRAS DE POLIPROPILENO APLICADO A VIGAS DE BERNOULLI CON ARMADURA TRADICIONAL DE ACERO

Facundo Atuel Retamal¹, Viviana Carolina Rougier²

1 Grupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional.

2 Grupo de Investigación de Mecánica Computacional y de Estructuras, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional.

Palabras Clave: hormigón celular espumado, vigas híbridas, fibras de polipropileno, campaña experimental.

Introducción

El hormigón armado es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo y sus aplicaciones son numerosas y variadas [1]. Debido a los avances tecnológicos y desafíos arquitectónicos, surge la necesidad de desarrollar nuevos tipos de hormigones y también soluciones estructurales innovadoras. Se genera así el interés por utilizar estructuralmente hormigones especiales, diseñados para usos específicos. Entre ellos, se pueden mencionar el hormigón liviano (HL) y el hormigón reforzado con fibras, entre otros [2]. El hormigón celular espumado (HCE) se clasifica como HL y su comportamiento estructural sigue este supuesto [3]. Se compone de cemento, agua, espuma preformada y puede incorporar o no, arena u otro agregado fino, además de adiciones minerales activas o inertes, entre otras variantes para su preparación. Comparado con el hormigón normal (HN), posee menor rigidez y mayor fragilidad [4], como es habitual en los HL. A pesar de esto, y debido, entre otros factores, a las situaciones descritas en el párrafo anterior, el uso estructural del HC y, en particular, del HCE, está aumentando, con variadas investigaciones al respecto [5, 6, 7, 8].

En este trabajo se evaluó el comportamiento a flexión del HCE simple y reforzado con fibras de polipropileno (HCERFPP) a través de la confección y evaluación de vigas con estos materiales y de su comparación con una viga de control (VC) elaborada con HN, obteniéndose resultados prometedores.

Materiales y métodos

Se elaboraron 3 vigas de hormigón armado reemplazando el HN por HCERFPP con diferentes dosificaciones de fibras: 0,0%, 0,5% y 1,0%, denominando a estas mezclas como HCE, HCERFPP-0,5 y HCERFPP-1,0 respectivamente. A su vez, las vigas se denominaron: V-1, elaborada con HCE simple; V-2, fabricada con HCERFPP-0,5; y V-3, a la construida con HCERFPP-1,0. Se compararon con una viga de control materializada con HN sin fibras, denominada VC. Todas las vigas se construyeron con una sección transversal de 80 mm de ancho por 160 mm de alto, con una longitud total de 1100 mm y se ensayaron a flexión a cuatro puntos. Las barras de refuerzo longitudinales fueron de acero comercial DN A 420 S de 6 mm de diámetro: 2 en la capa inferior y 2 en la capa superior. Para los estribos se utilizaron barras del mismo tipo y diámetro, con 100 mm de separación entre cada uno. Los soportes de las vigas consistieron en soportes de rodillos en los dos extremos. Ubicando los apoyos a 50 mm de cada extremo de la viga, se obtuvo una luz entre apoyos de 1000 mm. La carga se aplicó utilizando una máquina de ensayo universal con una capacidad para 1000 kN. Se usaron dos potenciómetros, colocados en los laterales de cada viga, en posición vertical, para registrar la deflexión en la mitad de la luz. Los datos fueron recolectados por un sistema de equipo de medición continua de carga-deflexión y se analizaron para obtener las curvas carga-deformación.

En la Tabla 1 se presentan los diseños de mezclas de materiales. Los materiales utilizados para preparar la mezcla base de pasta de cemento para el HCE fueron cemento Pórtland compuesto (CPC 50), con una densidad específica igual a 2,954, determinada experimentalmente de acuerdo con la Norma ASTM C188; arena silíceo de río, con una densidad específica en condición superficial seca saturada igual a 2,65, obtenida de acuerdo con la Norma ASTM C128 y agua potable. Para preparar la espuma preformada, se utilizó un agente espumante de tipo sintético de marca comercial, disponible en el mercado local. Para la mezcla de HN se utilizaron los mismos materiales, excepto por la exclusión de la espuma preformada y la inclusión de agregado grueso. Este último, con una densidad específica igual a 2,63, determinada experimentalmente según la Norma ASTM C127, del tipo canto rodado silíceo. Las FPP utilizadas son del tipo "macro fibras" sintéticas, de longitud igual a 50 mm; 0,60 mm de diámetro; esbeltez o relación de aspecto (RA) igual a 83; 920 kg/m³ de densidad; módulo de elasticidad de 6 GPa y resistencia a la tracción de 548 MPa.

Se realizaron ensayos para caracterizar los materiales utilizados en esta campaña experimental. Se observa que la densidad del HCE no es la suma directa de los pesos por unidad de volumen de sus componentes. Para calcularla teóricamente se debe tener en cuenta la densidad específica de cada material componente en el cálculo del volumen final de la mezcla, debido a que la espuma preformada incrementa el volumen, sin aumentar prácticamente el peso. En este trabajo, las densidades se midieron pesando cada mezcla en recipiente de volumen conocido. La consistencia se evaluó con la prueba de asentamiento, según la norma ASTM C143, y con el ensayo de extendido para los HCE, según la norma ASTM C1611. De esta forma, se pudo observar y estudiar la alta fluidez de este material. También se realizaron pruebas de compresión simple en los diferentes hormigones utilizados: HCE, HCERFPP-0,5, HCERFPP-1,0 y NC, de acuerdo con la norma ASTM C39, utilizando probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro, por 30 cm de altura. También se evaluó la resistencia a tracción por flexión y la resistencia residual según el método RILEM TC 162-TDF, utilizando probetas con sección transversal cuadrada de 15 cm por 15 cm y 60 cm de largo. Para estudiar el comportamiento de los materiales se obtuvieron las curvas carga-deformación de estas probetas. Esto se hizo utilizando potenciómetros y una celda de carga. Se utilizó, además, una unidad HBM QuantumX MX840B, conectada a una computadora con el software CatmanEasy, para la obtención continua de datos.

Resultados y discusión

Los valores medios de los resultados de los ensayos de caracterización de los diferentes tipos de hormigones utilizados se presentan en la Tabla 2. Allí, se resumen: la densidad de los materiales; los resultados del ensayo de asentamiento; del ensayo de extendido; la resistencia a compresión; la resistencia a la tracción y la resistencia a la tracción residual ($f_{R,CMOD1}$, $f_{R,CMOD2}$, $f_{R,CMOD3}$, $f_{R,CMOD4}$) para el correspondiente desplazamiento de apertura de la boca de fisura (CMOD). Se utilizó el Cono de Abrams para medir asentamiento con la finalidad de poder evaluar también el extendido de la mezcla en simultáneo. La elevada trabajabilidad del material utilizado generó que algunos valores obtenidos para este ensayo superen los máximos permitidos por la norma para su utilización. Se optó por registrar igualmente estos valores. Se puede observar que la densidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción, fueron muy similares en cada una de las mezclas de HCE con y sin FPP, lo cual era de esperarse, debido a que se utilizó el mismo diseño de mezcla en los 3 casos, excepto por la cantidad de fibra adicionada. La densidad media de los 3 tipos de HCE fue de 1 473 kg/m³ y para el HN fue de 2 330 kg/m³. Luego, se obtuvo una reducción promedio de 37 % en densidad para HCE en comparación con HN.

Las 3 mezclas de HCE y la mezcla de HN tuvieron una fluidez importante, no siendo ninguna de ellas autocompactante, y fue apreciable la reducción de fluidez con la adición de fibras. No se consideró el extendido en el caso de HN, por no ser un material autonivelante ni autocompactante. Además, se reveló el efecto del volumen de fibras sobre la resistencia a la tracción residual de cada probeta, mostrando la efectividad de las FPP aplicadas al HCE. Estos resultados coinciden con las observaciones de Jhatial et al. [9], quienes trabajaron con mezclas de menor densidad y resistencia a la compresión.

Tabla 1: dosificaciones de hormigones utilizados.

Material	HCE	HCERFPP -0.5	HCERFPP -1.0	HN
Cemento [kg/m ³]	1 049	1 049	1 049	390
Arena [kg/m ³]	500	500	500	734
Ag. grueso [kg/m ³]	-	-	-	1 019
Agua [kg/m ³]	350	350	350	195
Espuma [kg/m ³]	5,25	5,25	5,25	-
Fluidificante [kg/m ³]	-	-	-	4,68
Fibras [%]	-	0,50	1,00	-

Tabla 2: resultados de caracterización de materiales.

Material	HCE	HCERFPP -0.5	HCERFPP -1.0	HN
Densidad [kg/m ³]	1 469	1 504	1 446	2 330
Asentamiento [cm]	25,80	24,10	20,80	18,70
Extendido [cm]	40,20	36,50	33,10	-
Resist. comp. [MPa]	14,57	14,12	14,02	35,17
Resist. tracc. [MPa]	1,57	1,71	1,52	2,93
$f_{R,CMOD1}$ [MPa]	-	0,56	0,75	-
$f_{R,CMOD2}$ [MPa]	-	0,38	0,82	-
$f_{R,CMOD3}$ [MPa]	-	0,37	0,84	-
$f_{R,CMOD4}$ [MPa]	-	0,34	0,81	-

Tabla 3: resultados de ensayos sobre vigas.

Viga	Carga máxima [kN]	Peso [kg]	Reducción del peso [%]	Modo de falla
V-1	20,10	23,05	32,60	Corte
V-2	23,95	23,10	32,46	Flexión -corte
V-3	24,23	23,30	31,87	Flexión
VC	26,14	34,20	-	Flexión

En la Tabla 3 se presenta el resumen de los resultados de la campaña experimental llevada a cabo sobre las vigas de HCE, HCERFPP y HN. Allí se informan presentan la carga máxima alcanzada por cada viga, su peso propio, el porcentaje de reducción del peso propio respecto de la viga de control HN y el modo de falla. En la Figura 1 se muestran las curvas carga-desplazamiento para las 4 vigas elaboradas. Se observó que las vigas fabricadas íntegramente con HCE tienen una carga superior menor que la VC, pero con la adición de fibras, la resistencia aumenta hasta quedar sólo un 7% por debajo de la viga de control. Además, la adición de fibras a estas vigas aumentó notablemente su resistencia a esfuerzo cortante, disminuyendo la aparición de fisuras debido a este esfuerzo característico. También se puede observar la reducción de los picos de falla, en cada curva de las vigas V-1 a V-2 y V-3, debido a la adición de las FPP, lo que se muestra en la Figura 1. No se observó falla por rotura frágil en ninguna de las vigas ensayadas. Aunque la V-1, sin FPP, presentó importantes fisuras por corte, siendo ésta la falla predominante, se logró alcanzar el escalón de fluencia, conservando el monolitismo luego de la falla.

Conclusiones

De los resultados presentados y del análisis desarrollado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

El empleo de HCE en vigas esbeltas de tipo Bernoulli, con armadura tradicional de acero, devino en tipologías de falla cuasi dúctil, lo que resulta promisorio para avanzar en la profundización de estos estudios. Esto, a pesar de haberse elaborado con una mezcla base de HCE con una resistencia a compresión inferior a la mínima reglamentaria para hormigones estructurales.

El agregado de las FPP mejoró la respuesta mecánica de las vigas, aumentando el valor de la carga última alcanzado por cada una al incrementarse la dosis de fibras.

El aumento de la dosis de FPP disminuyó notablemente la aparición de fisuras de corte en los elementos estructurales.

La rigidez de cada elemento estructural fabricado con HCE también aumentó al aumentar la dosis de FPP incorporada al material.

La aplicación del HCE con y sin fibras permitió lograr una disminución de entre 31,87% y 32,60% del peso propio de los elementos estructurales.

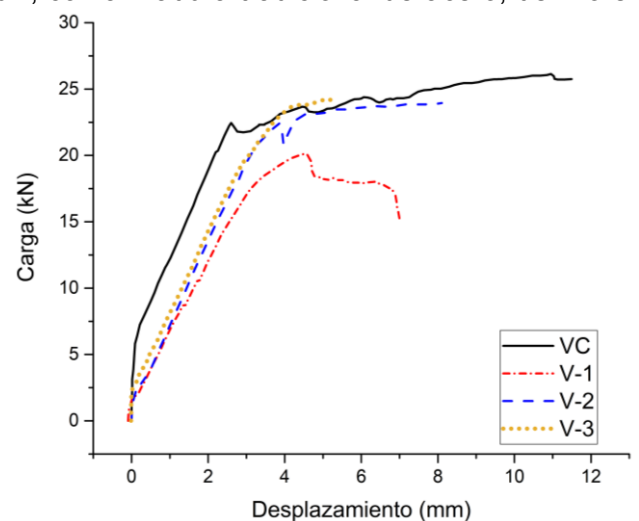


Figura 1 – Curvas carga-desplazamiento de las vigas ensayadas.

Referencias

- [1] Lee, Y. L., Lim, J. H., Lim, S. K., and Tan, C. S. (2018). Flexural behaviour of reinforced lightweight foamed mortar beams and slabs. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(8):2880–2889.
- [2] Hardjasaputra, H., Ng, G., Urgessa, G., Lesmana, G., and Sidharta, S. (2017). Performance of lightweight natural-fiber reinforced concrete. In *MATEC Web of Conferences*, volume 138, page 01009. EDP Sciences.
- [3] Retamal, F. A. and Rougier, V. C. (2021). Experimental study and development of an analytical model of stress-strain curve for foamed cellular concrete in uniaxial compression. *26° Argentine Conference on Structural Engineering*, pages 1–15. (In Spanish).
- [4] Jones, M. and McCarthy, A. (2005a). Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of concrete research*, 57(1):21–31.
- [5] Hoff, G. C. (1972). Porosity-strength considerations for cellular concrete. *Cement and Concrete Research*, 2(1):91–100.
- [6] Nambiar, E. K. and Ramamurthy, K. (2008). Models for strength prediction of foam concrete. *Materials and structures*, 41(2):247–254.
- [7] Jones, M. and McCarthy, A. (2005b). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. *Fuel*, 84(11):1398–1409.
- [8] Tam, C., Lim, T., Sri Ravindrarajah, R., and Lee, S. (1987). Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete. *Magazine of Concrete Research*, 39(138):12–18.
- [9] Jhatial, A. A., Goh, W. I., Mohamad, N., Hong, L. W., Lakhari, M. T., Samad, A. A. A., and Abdullah, R. (2018). The mechanical properties of foamed concrete with polypropylene fibres. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.7):411–413.