

Estudio preliminar de la viabilidad de hormigones con fibra metálica de neumáticos fuera de uso para pavimentos autocalefaccionantes

Preliminary feasibility study of concrete with metallic fibres from end-of-life tires for self-heating pavements

Fecha de entrega: 11 de agosto 2025
Fecha de aceptación: 20 de noviembre 2025

Yasna Segura¹, Pedro Vidal², Berta Vivar¹, Claudio Villarreal¹,
Rolando Aguilar¹, Cristian Borquez³

¹ Universidad de Magallanes, Facultad de Ingeniería, Av. Bulnes 01855, Punta Arenas, Chile, yasna.segura@umag.cl (<https://orcid.org/0000-0001-6394-5392>), berta.vivar@umag.cl (<https://orcid.org/0000-0003-3396-6656>), claudio.villarreal@umag.cl, rolando.aguilar@umag.cl

² Constructora Salfa, José Loncharic 01785, Punta Arenas, Chile, pedrovidal.2001@gmail.com

³ Dirección Regional de Aeropuertos, Croacia 722, Piso 7, Punta Arenas, Chile, cristian.borquez@mop.gov.cl

La investigación explora alternativas a las fibras metálicas industriales (FMI) utilizadas en hormigón, planteando su sustitución por fibra metálica proveniente de neumáticos fuera de uso (FMNFU) y por viruta de acero (VA). El objetivo consiste en analizar los efectos de la incorporación de FMNFU en el comportamiento mecánico y físico de hormigones destinados a pavimentos autodescongelantes. Los ensayos indican que la mezcla 1,5FMI+13,5VA presenta una resistencia a la compresión equivalente a la del hormigón convencional, mientras que la mezcla 1,5FMNFU+13,5VA evidencia una disminución del 25,9% respecto del control, atribuida a la presencia de contaminantes. No obstante, se observa un desempeño térmico superior en la mezcla con FMNFU, la cual muestra una eficiencia 3,4 veces mayor en el incremento de temperatura interna en comparación con la mezcla que incorpora FMI. En conjunto, estos resultados sugieren oportunidades de innovación para la industria del hormigón, al evidenciar que la utilización de materiales reciclados como la FMNFU puede contribuir no solo a la reducción de costos y de la huella de carbono, sino también a una mejora del comportamiento térmico en pavimentos.

Palabras clave: hormigón, pavimento, hormigón fibroreforzado, fibra metálica de neumático fuera de uso

This research explores alternatives to industrial metal fibres (IMF) used in concrete, proposing their replacement with metal fibres from end-of-life tires (ELTF) and steel shavings (SS). The objective is to analyse the effects of incorporating ELTF on the mechanical and physical behaviour of concrete intended for self-defrosting pavements. Tests indicate that the 1.5% IMF + 13.5% SS mixture exhibits compressive strength equivalent to that of conventional concrete, while the 1.5% IMF + 13.5% SS mixture shows a 25.9% decrease compared to the control, attributed to the presence of contaminants. However, superior thermal performance is observed in the mixture with ELTF, which demonstrates 3.4 times greater efficiency in increasing internal temperature compared to the mixture incorporating IMF. Taken together, these results suggest opportunities for innovation in the concrete industry, showing that the use of recycled materials such as FMNFU can contribute not only to reducing costs and the carbon footprint, but also to improving the thermal performance of pavements.

Keywords: concrete, pavement, fibre-reinforced concrete, metal fibre from end-of-life tires

Introducción

La región de Magallanes y de la Antártica Chilena presenta un clima frío y subpolar oceánico,

caracterizado por temperaturas bajas durante todo el año.

En el periodo invernal, las temperaturas oscilan entre -1°C y 5°C , mientras que en verano varían entre 5°C y

12°C. Las heladas pueden ocurrir en cualquier época del año (IGM, 2009). Asimismo, se observan eventos de olas de frío, definidos como aquellos en que la temperatura mínima diaria iguala o desciende por debajo de un umbral específico durante tres días consecutivos. Durante julio y agosto de 2023 se reportan precipitaciones de nieve que generan acumulaciones cercanas a 10 cm en vías urbanas y carreteras (DGAC, 2024).

Esta acumulación origina diversas problemáticas, que incluyen dificultades para el tránsito vehicular, interrupciones en actividades económicas y episodios de aislamiento en sectores rurales. En el aeropuerto de Punta Arenas, las nevadas intensas obligan a ejecutar labores de despeje para mantener la operatividad, lo que produce retrasos y cancelaciones de vuelos. Para reducir estos impactos, resulta fundamental remover la nieve y el hielo desde los pavimentos urbanos e interurbanos.

Sin embargo, los métodos tradicionales, como el barrido mecánico y la aplicación de sales, presentan efectos adversos a largo plazo sobre la infraestructura vial. La aplicación continua de sales, particularmente cloruros, incrementa la degradación superficial del hormigón por ciclos de congelamiento/deshielo, lo cual reduce la vida útil de los pavimentos. Adicionalmente, el barrido mecánico puede generar desgaste abrasivo, provocar fisuración prematura en superficies envejecidas y aumentar los costos de mantenimiento debido a intervenciones más frecuentes.

Una de las soluciones pasivas que actualmente concentra interés es la implementación de pavimentos autocaldeacionantes para la remoción de nieve y hielo en infraestructura vial. Estos sistemas incorporan mecanismos de calefacción dentro del pavimento, con el fin de elevar la temperatura por sobre 0 °C y permitir el deshielo del material superficial, favoreciendo la continuidad operativa del tránsito en climas fríos.

Dentro de las tecnologías disponibles, los pavimentos con calefacción hidrónica (PCH) operan mediante la circulación de un fluido calentado a través de tuberías empotradas en la estructura del pavimento. No obstante, esta alternativa presenta restricciones relevantes, asociadas principalmente a los altos costos iniciales, la complejidad constructiva y las dificultades de mantenimiento derivadas de posibles fugas del fluido transportado.

En paralelo, se investiga la incorporación de materiales de cambio de fase (MCF) en hormigones destinados a pavimentos autocaldeacionantes. Si bien estos materiales pueden contribuir al almacenamiento y liberación térmica, su inclusión en la matriz cementicia tiende a disminuir las propiedades mecánicas y evidencia limitaciones operacionales en condiciones de bajas temperaturas debido a su fase amorfa y a su elevada resistividad eléctrica (Malakooti *et al.*, 2021).

Otra alternativa corresponde al uso de hormigón eléctricamente conductor (HEC), el cual se caracteriza por su capacidad para generar calor mediante la aplicación de una corriente eléctrica. En este caso, una tensión se aplica entre electrodos embebidos en la capa de HEC, lo que induce el paso de corriente a través de los agregados conductores incorporados y produce un incremento térmico suficiente para promover el deshielo superficial. El HEC se formula a partir de hormigón convencional modificado con agregados conductores como carbón o acero, lo que reduce significativamente la resistividad eléctrica de la mezcla cementicia (Rahman *et al.*, 2022). Este sistema se compone de un suministro de corriente, electrodos, aislantes y termómetros, conocido como sistema de pavimentos autocaldeacionantes SPA (Abdualla, 2018).

La presente investigación tiene como objetivo analizar los efectos de la incorporación de FMNFU en el comportamiento mecánico y físico de hormigones destinados para pavimentos autodescongelantes, mediante la comparación de hormigón control con fibras metálicas industriales (FMI) y hormigones con FMNFU y viruta de acero (VA).

Materiales

Los materiales empleados en este estudio comprenden áridos gruesos y finos, cemento Portland puzolánico, agua, fibras metálicas industriales (FMI), fibras metálicas provenientes de neumáticos fuera de uso (FMNFU), viruta de acero reciclado (VA) y aditivos químicos.

Áridos

En la Figura 1 se presentan los resultados de la curva granulométrica correspondiente a la arena, la grava rodada y la grava chancada, determinada de acuerdo con la norma NCh165 (2009). La caracterización de los áridos constituye

un aspecto fundamental para la correcta dosificación de mezclas de hormigón, ya que permite asegurar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa chilena vigente. Los parámetros evaluados consideran la granulometría, la densidad real y aparente, así como la absorción de agua (ver Tabla 1). Conforme a lo estipulado en la norma NCh163 (2013), los áridos destinados a la elaboración de hormigones y morteros deben presentar una densidad real seca comprendida entre 2000 y 3000 kg/m³. Adicionalmente, el porcentaje de absorción permitido para las arenas no debe exceder el 3%, mientras que en el caso de las gravas este valor debe ser superior al 2%. El cumplimiento de estos requisitos es esencial para garantizar la estabilidad volumétrica, la trabajabilidad y el desempeño mecánico de las mezclas.

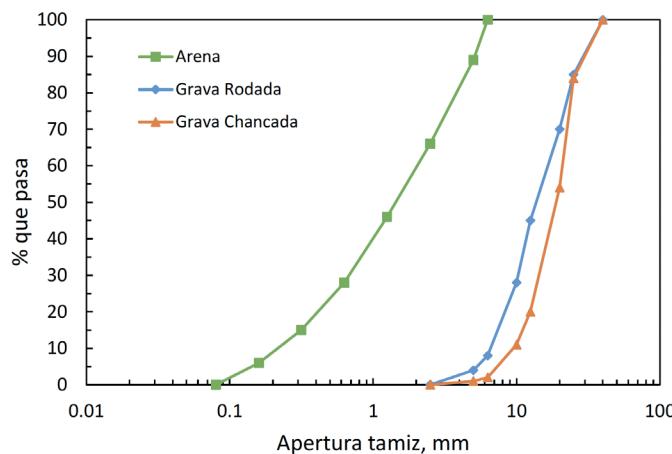


Figura 1: Granulometría de los áridos arena, grava rodada y chancada.

Tabla 1: Densidad y absorción de los áridos

Propiedades físicas	Arena	Grava rodada 1"	Grava chancada 1"	Norma
Densidad real saturado superficialmente seco $\rho_{R_{SSS}}$, kg/m ³	2406	2687	2517	NCh1239 (2009)
Densidad real seco ρ_R , kg/m ³	2341	2656	2500	
Densidad neta ρ_N , kg/m ³	2502	2741	2544	
Absorción de agua α , %	2,7	1,2	0,7	

Morteros

Se confeccionan probetas de mortero en moldes de 40×40×160 mm, de acuerdo con la NCh2260 (1996), las

cuales sirven para estudiar las características mecánicas desarrolladas por la mezcla una vez curado el mortero en estado saturado durante 7 y 28 días, con el propósito de seleccionar la dosificación con mayor resistencia mecánica y ensayarla posteriormente en las mezclas de hormigón. El proceso de mezclado se lleva a cabo inicialmente en seco, donde todas las partículas de áridos y los aditivos eléctricamente conductivos se unen de manera manual antes de agregar el agua y utilizar el mezclador eléctrico.

Como se presenta en la Tabla 2, se realizan ensayos con diversas combinaciones de materiales conductivos. En el caso de las fibras metálicas industriales (FMI) y las fibras metálicas de neumáticos fuera de uso (FMNFU), el contenido volumétrico se varía entre 0,75, 1,0, 1,25 y 1,5%. Para la viruta de acero reciclado (VA), se emplea una proporción fija del 13,5%. La cantidad de agua se ajusta a 275 g y la arena se reduce desde 1500 g a 1350 g para mantener la trabajabilidad de la mezcla al incorporar fibras; además, se utiliza un total de 500 g de cemento.

Tabla 2: Dosificación de mezclas de morteros ($a/c = 0,55$)

Nº	Código mezcla	Fibra, g		
		FMI	FMNFU	VA
M0	Control	0,0	0,0	0,0
M1	FMI 1,5%	32,7	0,0	0,0
M2	FMNFU 1,5%	0,0	32,7	0,0
M3	FMI 0,75% + VA 13,5%	15,9	0,0	287
M4	FMNFU 0,75% + VA 13,5%	0,0	15,9	287
M5	FMI 1,0% + VA 13,5%	21,3	0,0	287
M6	FMNFU 1,0% + VA 13,5%	0,0	21,3	287
M7	FMI 1,25% + VA 13,5%	26,5	0,0	287
M8	FMNFU 1,25% + VA 13,5%	0,0	26,5	287
M9	FMI 1,5% + VA 13,5%	32,7	0,0	287
M10	FMNFU 1,5% + VA 13,5%	0,0	32,7	287

Hormigones

Se realiza la mezcla de los materiales en una hormigonera, asegurando una composición uniforme y homogénea. Las fibras se incorporan a la mitad del proceso. Para cada tipo de hormigón se realizan dos mezclas. En la primera se confecciona una probeta prismática de 540×150×150 mm para los ensayos de flexión y de generación de calor. En la segunda preparación se confeccionan cuatro probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura,

Tabla 3: Dosificación hormigón control G25.

Material	Cemento	Agua	Rodado	Chancado	Arena	Incorporador de aire	Reductor de agua	Superplastificante
Unidad	kg/m ³	l/m ³	l/m ³	l/m ³				
Control G25	330	196	713	327	848	0,10	1,57	0,22

que se ensayan a los 7 y 28 días. En la Tabla 3 se observa la dosificación del hormigón control.

Métodos de medición de propiedades térmicas en hormigón endurecido

Para obtener un hormigón eléctricamente conductor HEC, se incorporan metales ferrosos con el fin de disminuir su resistividad eléctrica, propiedad que permite transformar el movimiento de electrones en calor. Esta propiedad se evalúa según el procedimiento descrito por Yehia y Tuan (1998). Una probeta prismática de 540×150×150 mm se modifica durante el moldeado en estado fresco, embutiendo dos electrodos de acero galvanizado liviano (perfil L de 63×25 mm) ubicados a 5 cm de los extremos laterales, y colocando en su interior una termocupla DS18B20 con salida PT100, posicionada en el punto medio de su longitud total para medir la temperatura interna del material, como se muestra en la Figura 2(a).

Posteriormente, se ensambla un circuito eléctrico que utiliza un Variac como fuente de poder ajustable, conectado a los electrodos de la probeta de hormigón y a las termocuplas para registrar la temperatura interna. La salida del Variac se ajusta y se mantiene en operación durante al menos 30 min, como se observa en la Figura 2(b).

El método utilizado se basa en el trabajo de Wang y Aslani (2019), donde la probeta se coloca en un congelador preestablecido a -19°C durante 24 horas para evaluar su capacidad de aumentar su temperatura al menos 4°C en un ciclo de 30 min. Una vez alcanzada la temperatura objetivo, la probeta se retira y se conectan los cables del termopar a los puntos de medición en su superficie. La temperatura se registra en tiempo real mediante el dispositivo de adquisición de datos (DAQ) y los datos se procesan en el software GPS WialonLocal mientras se suministra corriente a la probeta en intervalos regulares, hasta alcanzar los 4°C, indicando la finalización del proceso de autocalefacción.

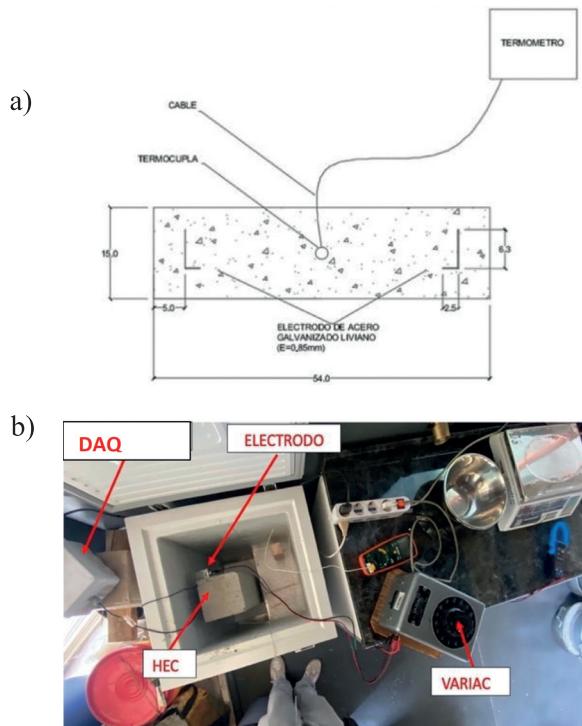


Figura 2: Circuito eléctrico: a) esquema probeta HEC y b) configuración en el laboratorio

Resultados

Ensayo de resistencia a la compresión de mortero

En la Figura 3 se presenta la resistencia a compresión de los morteros ensayados a 7 y 28 días. La mezcla M9 evidencia un incremento del 37,4% a los 7 días, mientras que la mezcla M10 registra un aumento del 21,6% en el mismo periodo. No obstante, a los 28 días ambas mezclas experimentan una disminución en la tasa de aumento de su resistencia: M9 se reduce en 4,5% y M10 en 2,4% respecto de sus valores iniciales. Esta variación pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo una evaluación más detallada de las dosificaciones de fibras metálicas y de los aditivos incorporados, con el fin de optimizar el desempeño resistente del mortero.

En las Figuras 4(a) y 4(b) se presentan los resultados relativos a la ganancia o pérdida de resistencia a compresión. Se utilizó como referencia el mortero control M0, con el

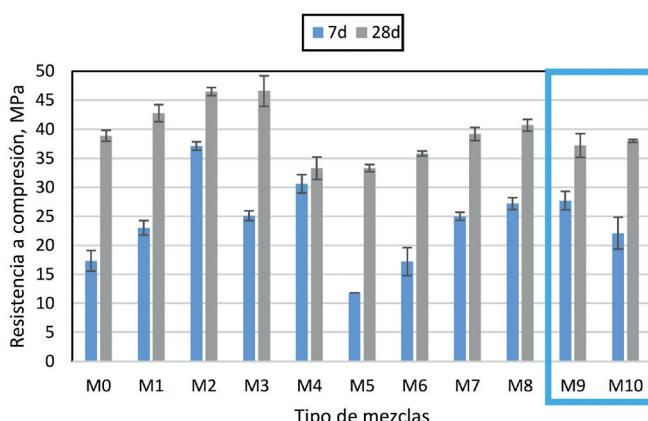


Figura 3: Resistencia mecánica a la compresión, 7 y 28 d.

propósito de evaluar el efecto de la incorporación de FMI y FMNFU en fracciones de 0,75, 1, 1,25 y 1,5%, combinadas con un 13,5% de VA. Los resultados muestran que, tanto a los 7 como a los 28 días, la mayoría de las mezclas exhiben un incremento en la resistencia, mientras que únicamente las mezclas M5 y M6 presentan reducciones. Estos comportamientos indican que el uso de fibras metálicas recicladas presenta un desempeño comparable al de las fibras metálicas industriales.

Se opta por trabajar con la mezcla que contiene un 1,5% de FMI o FMNFU y un 13,5% de VA, debido a que destaca por su resistencia mecánica a compresión en morteros. Además, estas combinaciones presentan la mayor cantidad de fibra.

Propiedades del hormigón fresco

En la Tabla 4 se muestran que la mezcla control G25 registra un asentamiento de 11 cm, mientras que las mezclas con FMI 1,5% + VA 13,5% y FMNFU 1,5% + VA 13,5% presentan un asentamiento de 0 cm, evidenciando una pérdida total de trabajabilidad atribuida a la incorporación de fibras metálicas recicladas. En cuanto a la temperatura, los valores se mantienen relativamente estables entre las mezclas, fluctuando entre 17,3 °C y 18,7 °C. Respecto a la densidad aparente, tanto la mezcla con FMI como la mezcla con FMNFU muestran incrementos sustanciales alcanzando 2518 kg/m³ y 2521 kg/m³, respectivamente, en comparación con el control (2295 kg/m³). Estos resultados sugieren que la adición de fibras metálicas y viruta de acero incrementa la compacidad del hormigón, modificando su densidad y su comportamiento en estado fresco.

Tabla 4: Propiedades del hormigón en estado fresco.

Mezcla	Asentamiento, cm	Temperatura, °C	Densidad aparente, kg/m ³
Control G25	11	18,7	2295
FMI 1,5 + VA 13,5	0	17,7	2518
FMNFU 1,5 + VA 13,5	0	17,3	2521

En cuanto a la densidad del hormigón en estado fresco, los resultados mostraron variaciones significativas entre las diferentes mezclas, tanto hormigón con FMI + VA como el de FMNFU + VA presentaron aumentos significativos en su densidad aparente en comparación con el Control, sugiriendo que la adición de fibra metálica influye en la compactación y estructura del hormigón.

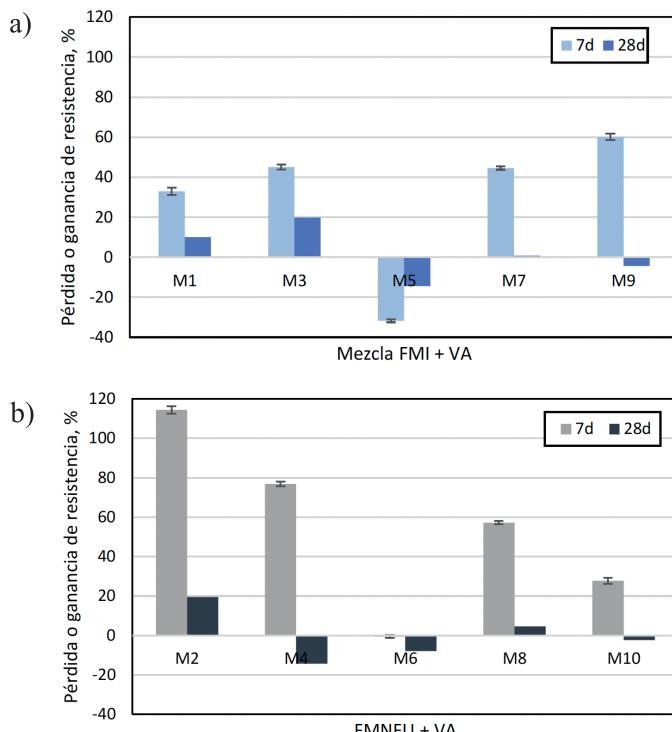


Figura 4: Ganancia de la resistencia a compresión para morteros: a) FMI + VA a 7 y 28 d. y b) FMNFU + VA a 7 y 28 d.

Resistencia a compresión del hormigón

Para la resistencia a compresión a los 28 días, se observa que el hormigón con FMI 1,5% + VA 13,5% muestra una resistencia ligeramente superior a la del control, alcanzando 25,4 MPa y 25,1 MPa, respectivamente (ver Figura 5). En contraste, el hormigón con FMNFU 1,5%

+ VA 13,5% experimenta una reducción significativa, registrando 18,6 MPa, lo que destaca la importancia de evaluar cuidadosamente los efectos de estas adiciones en las propiedades del hormigón. Este comportamiento se muestra consistente con lo reportado por Zhang y Gao (2020). Estos hallazgos proporcionan información relevante para la optimización de futuras dosificaciones y el diseño de hormigones autodescongelantes con mejores características de resistencia y trabajabilidad.

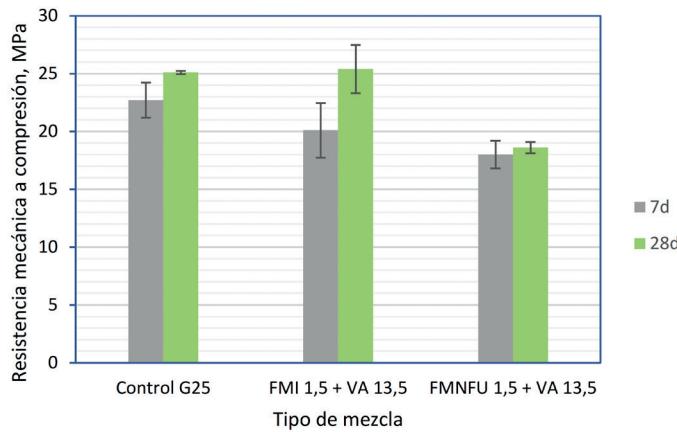


Figura 5: Resistencia a la compresión del hormigón a los 7 y 28 días

Propiedades térmicas del hormigón

Una vez que las probetas prismáticas permanecen durante un día en un congelador a -18°C , se procede a conectar la fuente de alimentación para iniciar el proceso de autocalefacción. Se aplican 200 V para el hormigón control G25 y 110 V para los hormigones con adiciones eléctricamente conductivas, valores seleccionados para simular condiciones de corriente comercial. La Figura 6 muestra que, en 120 min, la temperatura aumenta aproximadamente 16°C en la muestra principal del estudio. A partir de los 90 min, la velocidad de incremento térmico se intensifica, siendo la probeta FMNFU 1,5% + VA 13,5% la que presenta la variación más pronunciada en la pendiente. Esto resulta en un aumento promedio de $0,14^{\circ}\text{C}/\text{min}$, lo que indica una capacidad de autocalefacción 88% mayor en comparación con el hormigón FMI 1,5% + VA 13,5%. En contraste, el incremento de temperatura se mantiene lineal en la mezcla con FMI 1,5% + VA 13,5%, alcanzando un máximo de $16,2^{\circ}\text{C}$ después de 2 h de ensayo. Este comportamiento térmico evidencia la eficacia del hormigón eléctricamente

conductivo para generar calor de forma controlada y sostener un incremento térmico adecuado durante el proceso.

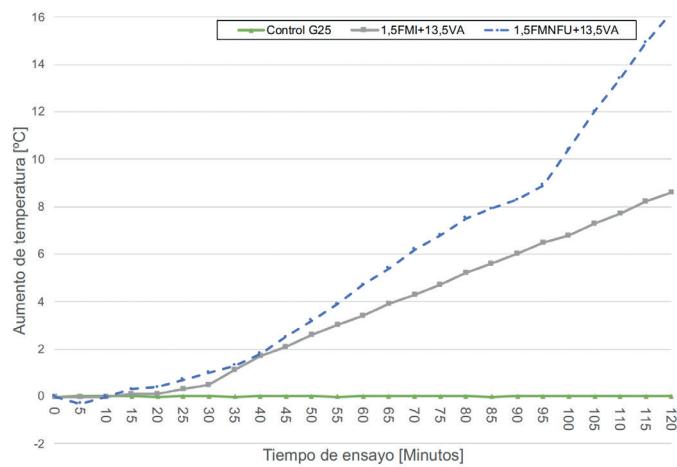


Figura 6: Variación de temperatura en Control G25, 1,5FMI+13,5VA y 1,5FMNFU+13,5VA

Conclusiones

La adición de fibras presenta retos significativos en la trabajabilidad del hormigón fresco, reduciendo su fluidez inicial a niveles cercanos a cero. En particular, la densidad del hormigón en estado fresco aumenta de manera considerable en las mezclas con fibras metálicas industriales (FMI) y viruta de acero (VA), lo que complica el proceso de amasado. No obstante, estas mezclas logran igualar la resistencia a compresión del hormigón control. En contraste, la mezcla con FMNFU y VA muestra una reducción en la resistencia, lo que indica la necesidad de mejorar tanto su trabajabilidad como su capacidad resistente. Por otro lado, se comprueba que la incorporación de materiales eléctricamente conductivos modifica las propiedades físicas del hormigón, permitiendo un aumento controlado de la temperatura. Aunque aún se requiere optimizar su implementación práctica, estos resultados abren la posibilidad de mejorar el rendimiento térmico con un menor consumo energético, lo que representa un avance prometedor en el desarrollo de hormigones autocalefaccionantes.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Magallanes por financiar esta investigación mediante el Proyecto Interno

de Investigación (Programa 021012) y al Grupo de Estudio de Ingeniería Sustentable (GEIS). Además, este trabajo fue posible gracias a la Empresa Concremag S.A. y Asmar Magallanes.

Referencias

- Abdualla, H. (2018). *Design, construction, and performance of heated concrete pavements system*. PhD thesis, Iowa State University, USA.
- DGAC (2024). Dirección Meteorológica de Chile. Servicios climáticos. Dirección General de Aeronáutica Civil. <https://climatologia.meteochile.gob.cl>
- IGM (2009). Atlas geográfico para la educación. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile
- NCh2260 (1996). Morteros—Preparación de prueba y mezclas comparativas en el laboratorio. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile.
- NCh165 (2009a). Áridos para morteros y hormigones—Tamizado y determinación de la granulometría. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile.
- NCh1239 (2009). Áridos para morteros y hormigones—Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de las arenas. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile.
- NCh1117 (2010). Áridos para morteros y hormigones—Determinación de las densidades reales y netas y de la absorción de agua de las gravas. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile.
- NCh163 (2013). Áridos para morteros y hormigones—Requisitos. Instituto Nacional de Normalización INN, Santiago, Chile.
- Malakooti, A., Sadati, S., Ceylan, H., Kim, S., Cetin, K.S., Taylor P.C., Mina, M., Cetin, B. and Theh, W.S. (2021). Self-heating electrically conductive concrete demonstration project. IHRB project TR724. Institute for Transportation, Iowa State University, USA
- Rahman, M.L., Malakooti, A., Ceylan, H., Kim, S. and Taylor, P.C. (2022). A review of electrically conductive concrete heated pavement system technology: From the laboratory to the full-scale implementation. *Construction and Building Materials* **329**, 127139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127139>
- Wang, L. and Aslani, F. (2019). A review on material design, performance, and practical application of electrically conductive cementitious composites. *Construction and Building Materials* **229**, 116892. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116892>
- Yehia, S.A. and Tuan, C.Y. (1998). Bridge deck deicing. *Transportation Conference*, University of Nebraska at Omaha, USA, 51-57.
- Zhang, Y. and Gao, L. (2020). Influence of tire-recycled steel fibers on strength and flexural behavior of reinforced concrete. *Advances in Materials Science and Engineering* 2020, 6363105.