Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Desarrollo de concretos ligeros de ultra alto rendimiento para aplicaciones arquitectónicas.

J. Xilotl-Dominguez[1]*, A. Duran-Herrera[1], L. López-Yépez[1], A. Muñoz-Espinoza[1]
*Autor de Contacto: jorge.a.x@hotmail.com
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.907

Recibido: 17/09/2024 | Correcciones recibidas: 29/05/2025 | Aceptado: 13/03/2025 | Publicado: 01/09/2025

RESUMEN

Este estudio busca reducir el peso y mejorar el rendimiento térmico del Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC) para aplicaciones arquitectónicas, manteniendo una resistencia mecánica adecuada. Para lograrlo, se utilizaron perlas de poliestireno expandido (EPP) para reemplazar la arena de piedra caliza (0, 30, 55, 80 y 100% en masa) y se añadieron fibras estructurales sintéticas de Alcohol Polivinílico (PVA). Las mezclas se evaluaron en resistencia a compresión y flexión, resistividad eléctrica superficial y volumétrica, y conductividad térmica. Los resultados mostraron que el EPP redujo significativamente la densidad y la conductividad térmica, mientras que el PVA mejoró la resistencia. Sin embargo, altos contenidos de EPP disminuyeron el desempeño mecánico. La combinación de EPP y PVA en UHPC es innovadora. Se concluyó que mezclas optimizadas pueden equilibrar eficiencia térmica e integridad estructural para usos arquitectónicos.

Palabras clave: concreto de ultra alto desempeño; durabilidad; resistividad eléctrica; Fibras PVA; propiedades térmicas.

Citar como: Xilotl-Domínguez, J., Durán-Herrera, A., López-Yépez, L., Muñoz-Espinoza, A. (2025), "*Desarrollo de concretos ligeros de ultra alto rendimiento para aplicaciones arquitectónicas.*", Revista ALCONPAT, 15 (3), pp. 299 – 314, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.907

[1] Dpto de Tecnología del Concreto, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo, la autora Xilotl-Domínguez contribuyó con la actividad del desarrollo experimental y el primer esbozo de la escritura, el autor Durán-Herrera (80%) y López-Yépez (20%) con la actividad del desarrollo teórico del enfoque experimental y guía del artículo, así como la idea original, redacción del trabajo, discusión de resultados, entre otros. El autor Muñoz-Espinoza colaboró aportando materiales en la parte experimental y aportes sobre las metodologías a seguir.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2025) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el segundo número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2026.

© 2025 ALCONPAT Internacional

Development of lightweight ultra high performance concrete to architectural applications.

ABSTRACT (13-point Times New Roman, bold)

This study aims to reduce the weight and enhance the thermal performance of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) for architectural applications while maintaining adequate mechanical strength. To achieve this, expanded polystyrene perlite (EPP) was used to replace limestone sand by mass (0, 30, 55, 80, and 100%) and synthetic Polyvinyl Alcohol (PVA) structural fiber was added. The mixes were evaluated for compressive and flexural strength, surface and bulk electrical resistivity, and thermal conductivity. Results showed that EPP significantly reduced density and thermal conductivity, while PVA improved strength. However, high EPP contents decreased mechanical performance. The combination of EPP and PVA in UHPC is innovative. It was concluded that optimized mixtures can balance thermal efficiency and structural integrity for architectural uses.

Keywords: lightweight UHPC; durability; thermal performance; electrical resistivity, PVA fibers.

Desenvolvimento de concreto leve de ultra alto desempenho para aplicações arquitetônicas.

RESUMO

Este estudo visa reduzir o peso e melhorar o desempenho térmico do Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC) para aplicações arquitetônicas, mantendo resistência mecânica adequada. Para isso, perlita de poliestireno expandido (EPP) foi utilizada para substituir a areia de calcário em massa (0, 30, 55, 80 e 100%) e fibras estruturais sintéticas de álcool polivinílico (PVA) foram adicionadas. As misturas foram avaliadas quanto à resistência à compressão e flexão, resistividade elétrica superficial e volumétrica, e condutividade térmica. Os resultados mostraram que o EPP reduziu significativamente a densidade e a condutividade térmica, enquanto o PVA aumentou a resistência. Contudo, altos teores de EPP diminuíram o desempenho mecânico. A combinação de EPP e PVA em UHPC é inovadora. Concluiu-se que misturas otimizadas podem equilibrar eficiência térmica e integridade estrutural para usos arquitetônicos.

Palavras-chave: UHPC leved; durabilidade; desempenho térmico; resistividade elétrica; fibras de PVA.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción se han propuesto diversos materiales y tecnologías para mejorar los procesos constructivos y optimizar el uso de los materiales. En este sentido, los Concretos de Ultra Alto Comportamiento (conocidos como UHPC, por sus siglas en inglés) son aquellos concretos con características destacables en cuanto a resistencia a la compresión, durabilidad y ductilidad. Estos concretos surgieron en la década de 1980 como una solución a la búsqueda de alta durabilidad mediante la implementación de modelos de empaquetamiento, que permiten reducir la porosidad al incrementar la densificación de la matriz cementante, lo que los hace altamente durables frente a diversos agentes externos potencialmente degradantes. Actualmente, de las aplicaciones en las que estos concretos están siendo ampliamente utilizados, las aplicaciones arquitectónicas se vuelven cada vez más relevantes, debido a su versatilidad para adoptar formas, texturas, acabados, etc.

El UHPC es un material que ha atraído el interés de la investigación y la industria de la construcción debido a que puede satisfacer necesidades tales como elementos esbeltos, alta durabilidad y una vida útil de más de 100 años (Azmee y Shafiq, 2018; Badogiannis et al., 2021), así como ductilidad gracias a la incorporación de fibras de acero (Alkadhim et al., 2022).

Los UHPC son un material compuesto cementicio que presenta mejores propiedades de resistencia a la compresión, ductilidad y durabilidad en comparación con los Concretos de Alto Comportamiento (High Performance Concrete). Los UHPC pueden contener fibras para otorgar ductilidad post-agrietamiento (Andrade y D'Andrea, 2011). Los UHPC se definen como concretos que tienen al menos una resistencia a la compresión ≥ 120 MPa en condiciones normales de curado y ≥ 150 MPa cuando son curados con vapor, y una resistencia a tensión ≥ 5 MPa (Badogiannis et al., 2021).

De igual forma, presentan relaciones agua/cementante bajas (0.15–0.25), alto empaquetamiento de la matriz (0.825–0.855), altos volúmenes de fibras de acero (≥ 2%), y para su producción es obligatorio el uso de un aditivo reductor de agua de alto rango o superplastificante para proporcionar alta fluidez a la mezcla (≥ 160 mm en el mini-cono) (Badogiannis et al., 2021).

El concreto ligero (LC) presenta propiedades distintas en comparación con el concreto convencional y el UHPC, incluyendo una menor densidad (típicamente 1,200–1,800 kg/m³) y mejor aislamiento térmico/acústico. Sus principales aplicaciones estructurales incluyen losas, rellenos de muros y paneles de recubrimiento, donde su peso reducido disminuye las cargas muertas y mejora la resistencia al fuego (Thienel et al., 2020).

Sin embargo, el concreto ligero se caracteriza por su baja resistencia a compresión y, en algunos casos, menor durabilidad, debido al uso de agregados ligeros, aditivos espumantes o inclusiones de aire. Por lo tanto, sustituir la matriz cementante típica por una matriz de UHPC podría ser una idea atractiva para aprovechar las fortalezas de ambas tecnologías.

El Concreto de Ultra Alto Comportamiento Ligero (conocido como L-UHPC) es la combinación de un UHPC convencional con la incorporación de agregados ligeros, lo que resulta en propiedades mejoradas, manteniendo características como un alto empaquetamiento de la matriz y baja relación agua/cemento (≤ 0.25), lo que permite conservar la durabilidad incluso con cierta reducción en la resistencia. De forma similar, los rangos de densidad para un L-UHPC pueden variar entre 1500 y 2000 kg/m³ (Badogiannis et al., 2021; Li et al., 2022).

Los L-UHPC conservan la matriz principal de un UHPC con la sustitución de agregados ligeros en lugar de agregados de peso normal. Los principales agregados usados en su fabricación son arcilla expandida, esferas de vidrio expandido, microesferas de ceniza volante y perlita expandida de poliestireno (EPP) (Shi et al., 2018). Asimismo, existen diferentes fibras utilizadas en los UHPC convencionales, siendo las más comunes las de acero, debido a sus propiedades de resistencia a tensión y alta ductilidad (Shi et al., 2018; Yang et al., 2022). Sin embargo, también se emplean

otras fibras como alcohol polivinílico (PVA), vidrio (G), polietileno (PE) y polipropileno (PP) (Shi et al., 2018; Yang et al., 2022; Abu et al., 2022; Le y Fehling, 2017; Gong et al., 2022).
Como un esfuerzo por reducir costos de mantenimiento, así como para proporcionar mayor durabilidad, larga vida útil de la estructura y agilizar la constructibilidad, diversos proyectos alrededor del mundo han buscado incorporar criterios de durabilidad en la construcción de infraestructura. Por lo tanto, para proyectos que requieren un material durable, resistente y dúctil, los UHPC pueden ser la alternativa de elección (Yang et al., 2022; Habil y Fehling, 2005).
Las principales aplicaciones de los UHPC van desde componentes estructurales, puentes, elementos arquitectónicos, reparación y rehabilitación, hasta componentes verticales para torres de viento. Sin embargo, sus usos y aplicaciones no están limitadas y pueden incluir refuerzo estructural, rehabilitación, elementos prefabricados y otras aplicaciones únicas (Akeed et al., 2022).
Asimismo, las propiedades mecánicas superiores del UHPC permiten el diseño y fabricación de componentes constructivos esbeltos, ligeros y estéticamente atractivos. Por ejemplo, el Museo de las Civilizaciones de Europa y del Mediterráneo, el primer edificio en utilizar ampliamente el UHPC, fue construido en 2013 en Marsella, Francia (Du et al., 2021). Otro ejemplo es el estadio Jean Bouin en París, que cuenta con 11,000 m² de paneles de concreto reforzado con fibras de ultra alto desempeño (UHPFRC) en los laterales y 10,000 m² en la cubierta (Mazzacane et al., 2013).
Algunos autores han desarrollado L-UHPC con diferentes propósitos, principalmente debido al uso de agregados de regiones locales para reducir el costo del producto final (Wang et al., 2021), y para mejorar el coeficiente de conductividad térmica (Dixit et al., 2019).
Este trabajo desarrolla un UHPC con incorporación de EPP para fachadas arquitectónicas que requieren resistencias menores a 120 MPa, pero con mayor durabilidad y ductilidad. El sistema reforzado con fibras de PVA resiste cargas de viento y degradación ambiental, al mismo tiempo que evita la corrosión de fibras de acero (Kishore et al., 2015).
En este trabajo se evaluaron cinco series de concretos con sustitución de arena caliza por diferentes porcentajes de EPP en volumen (0, 30, 55, 80 y 100%) y la incorporación de PVA. Para evaluar el efecto sinérgico del EPP y el PVA en una matriz de UHPC se examinaron las siguientes propiedades: resistencia a compresión, módulo de elasticidad, resistencia a flexión, resistividad eléctrica superficial, resistividad eléctrica volumétrica y conductividad térmica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para la producción de concreto en este estudio, se utilizaron: cemento Portland blanco compuesto (CPC 30R B, conforme a la norma NMX-C-414); metacaolín (GCC-METAFORCE); arena de calcita (tamaño máximo de partícula 4.76 mm, tamiz #4); filler de calcita (tamaño promedio de partícula 5.91 µm, proveniente del noreste de México); perlita expandida de poliestireno (EPP, tamaño máximo de partícula 1 mm); y fibras sintéticas estructurales de PVA (KURALON K-II) específicamente diseñadas para aplicaciones de UHPC. Las fibras de PVA, con dimensiones promedio del filamento de 12 mm de longitud y 200 µm de diámetro, se incorporaron en proporciones de 1.0%, 1.5% y 2.0% en volumen para determinar la dosificación óptima mediante ensayos de flexión en vigas.
Para lograr una alta fluidez, se utilizó un aditivo reductor de agua de alto rango o superplastificante a base de éter policarboxilato (SP, FLOWCON P01), y para mejorar la densificación del empaquetamiento de partículas se empleó un aditivo estabilizador (STA, EUCON WORKONTROL) con el fin de disminuir la pérdida de consistencia, así como un exclusor de aire (EX, HDS ISODENSE 250). Otras propiedades físicas de los materiales se reportan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas complementarias de los materiales.

ID	Material	Densidad, g/cm³	Absorción, %	d_{50}, µm	Longitud, mm	Diametro, mm	Contenido de Sólidos, %
CPC	Cemento Portland	3.02	-----	18.16	-----	-----	-----
MK	Metacaolín	2.58	-----	16.66	-----	-----	-----
AF	Agregado Fino	2.65	0.80	416.50	-----	-----	-----
F	Filler	2.67	-----	5.91	-----	-----	-----
EPP	Micro Perlita Expandida de Poliestireno	5.5×10^{-2}	0.00	-----	-----	< 1.0	-----
PVA	Fibra de Polivinyl Alcohol	1.30	-----	-----	12.0	0.2	-----
SP	Superplastificante	1.11	-----	-----	-----	-----	50.12
STA	Aditivo Estabilizador	1.10	-----	-----	-----	-----	40.00
EX	Aditivo exclusor de aire	0.98	-----	-----	-----	-----	35.00

2.2 Metodología

Para una relación agua/cementante (a/cm) fija de 0.22, el proceso de optimización para establecer las proporciones de la mezcla de referencia, con una resistencia mínima a compresión de 120 MPa y un flujo de revenimiento objetivo de 80 ± 2.5 cm, se determinó de acuerdo con el procedimiento estándar tal como se describe en la norma ASTM C1611-21, se prepararon las siguientes dosificaciones de CPC, MK, SP, STA y EX de 807.5 kg/m³, 142.5 kg/m³, 5.5–10.5 ml/kg de cm, 4.0 ml/kg de cm y 1.0 ml/kg de cm, respectivamente. El primer paso en la metodología de este trabajo consistió en obtener el diseño de mezcla de concreto, sus propiedades en estado fresco y endurecido, con el objetivo de alcanzar una resistencia mínima a compresión de 120 MPa a los 28 días en la mezcla de referencia. A partir de estas proporciones, se produjeron cuatro mezclas adicionales para evaluar el efecto de la dosificación de EPP en sustitución de la arena caliza en los siguientes porcentajes en volumen: 30, 55, 80 y 100%. En este estudio, las cinco mezclas fueron etiquetadas como R, MF3, MF5, MF8 y MF10, respectivamente.

Para alcanzar el revenimiento objetivo de 80 ± 2.5 cm en la mezcla de referencia, la dosificación del superplastificante (SP) fue de 9.0 mL/kg de material cementante (cm). Esta dosificación disminuyó progresivamente con el aumento en la sustitución de EPP: 8.3 mL/kg cm (30% EPP); 7.3 mL/kg cm (55% EPP); 6.8 mL/kg cm (80% EPP); y 5.2 mL/kg cm (100% EPP). Estas reducciones también condujeron a una disminución del revenimiento dentro del rango de 70 ± 5.0 cm. En comparación con la mezcla de referencia, la incorporación de fibras de PVA aumentó la dosificación de SP en 0.5 ml/0.5% de fibra de PVA necesaria para mantener el revenimiento.

Para la determinación de la resistencia a compresión, módulo de elasticidad estático, resistividad eléctrica superficial y volumétrica, así como conductividad térmica, se elaboraron cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C192-14, y posteriormente se mantuvieron en agua saturada con cal bajo condiciones estándar de curado (T = 23.0 ± 2.0°C, HR = ≥ 95%). Para la determinación de la resistencia a compresión, los cilindros se ensayaron por triplicado en una máquina universal con capacidad de 200 toneladas, a las edades de 3, 7, 28 y 56 días, conforme al procedimiento estándar descrito en ASTM C39-21, y los promedios de los resultados se utilizaron para construir las gráficas mostradas en las Figuras 1

y 2. La resistencia a compresión se determinó por triplicado.
Para la determinación del módulo de elasticidad estático, los especímenes se ensayaron por triplicado de acuerdo con el procedimiento estándar descrito en ASTM C469-14, y los promedios de los resultados se emplearon para construir la gráfica que aparece en la Figura 2.
Para la determinación de la resistencia a flexión, se elaboraron especímenes prismáticos de 7.5 × 7.5 × 30.0 cm, los cuales fueron colados en una sola capa y compactados mediante una mesa vibratoria, con la mínima intensidad de vibración y durante un periodo de 10 segundos. A una edad de entre 24 y 30 horas, los especímenes se desmoldaron y se sumergieron en agua saturada con cal bajo condiciones estándar de curado (T = 23.0 ± 2.0°C, HR = ≥ 95%) hasta su edad de ensayo a flexión a los 56 días, siguiendo el procedimiento descrito en UNE-EN 14651-2007. Para este ensayo, se colaron cinco especímenes por cada una de las mezclas de concreto, y las curvas promedio se muestran en la Figura 3.
La resistividad superficial y volumétrica se determinó a 7, 28 y 56 días siguiendo los procedimientos descritos en AASHTO TP 95-14 y ASTM C1876-19, y los promedios de los resultados se utilizaron para construir las gráficas mostradas en la Figura 4. La conductividad térmica se determinó mediante el método del calor transitorio en especímenes secos al aire a la edad de 7 días, de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM D5334-2, y los promedios de los resultados se emplearon para construir las gráficas mostradas en la Figura 5. Se elaboraron tres especímenes para determinar la conductividad térmica y la resistividad eléctrica.
Las resistencias residuales post-agrietamiento se determinaron mediante el ensayo de flexión de vigas reforzadas con fibras, las cuales, durante su preparación, fueron ranuradas con una sierra diamantada en el centro de su longitud, conforme al procedimiento descrito en UNE-EN 14651-2007. En este ensayo se midieron los valores de carga y las aperturas progresivas de fisura (CMOD) correspondientes. La adquisición progresiva de las aperturas de fisura (CMOD) se realizó con un extensómetro tipo clip de la marca Epsilon, modelo 3541, y una unidad de adquisición de datos (DAQ) de la marca National Instruments, la cual se vinculó a una computadora durante el ensayo mediante el software LabVIEW.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resistencia a la compresión

La propiedad principal que define si un concreto puede clasificarse como UHPC es su resistencia a la compresión. De acuerdo con el informe FHWA-HRt-13-060 de la Federal Highway Administration de Estados Unidos, un UHPC debe alcanzar una resistencia mínima de 120 MPa. En este estudio, las mezclas evaluadas se diseñaron con base en proporciones típicas de UHPC utilizando cemento blanco, arena y filler calizos provenientes del área metropolitana de Monterrey, México, alcanzando resistencias de 105 y 140 MPa a los 28 y 56 días. Sin embargo, para cumplir con objetivos estéticos y obtener un concreto lo más blanco posible, la arena y el filler calizos fueron reemplazados por calcita blanca con tamaños de partícula equivalentes.

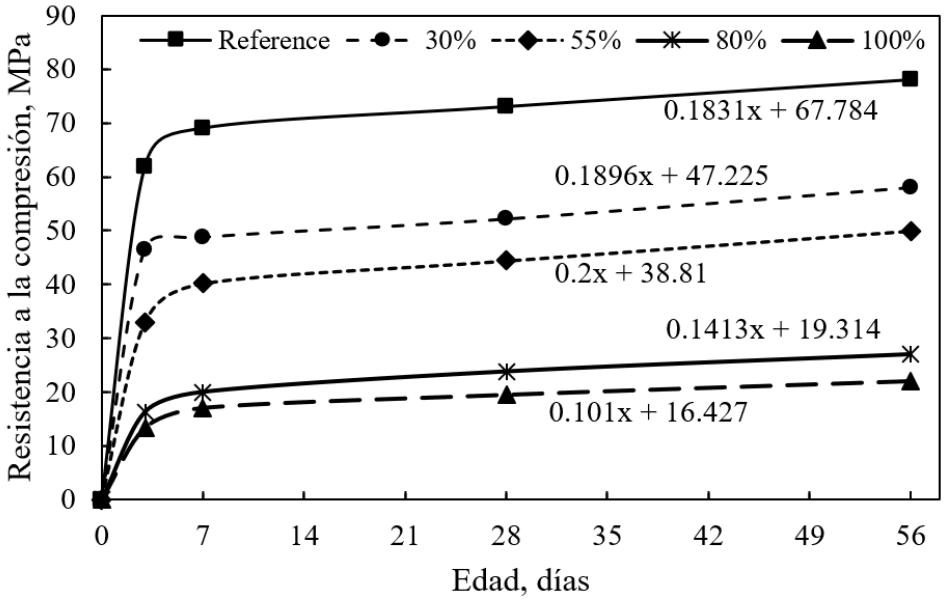


Figura 1. Desarrollo de la resistencia a la compresión de mezclas con contenidos de 0, 30, 55, 80 y 100 % de EPP en volumen en sustitución de la arena y polvo de calcita.

La Figura 1 muestra el desarrollo de la resistencia a compresión hasta los 56 días para las cinco mezclas evaluadas. Todas presentaron un desarrollo significativo de resistencia temprana, alcanzando entre 68.5% y 89.1% de su resistencia a 28 días en solo tres días. Este rápido incremento se atribuye a la alta reactividad del cemento y a la baja relación agua/cementante (w/cm = 0.22). En particular, las resistencias a los 3 días respecto a los 28 días fueron: 84.4% (0% EPP), 89.1% (30% EPP), 74.3% (55% EPP), 68.5% (80% EPP) y 68.7% (100% EPP). En relación con los 56 días, estos valores correspondieron a 79.4%, 80.2%, 66.0%, 60.4% y 60.9%, respectivamente. Entre los 7 y 56 días, se observa claramente la contribución puzolánica del metacaolín (MK), con incrementos en la resistencia de 0.18, 0.19, 0.20, 0.14 y 0.10 MPa/día, respectivamente.
La sustitución de calcita por EPP provocó reducciones significativas en la resistencia a compresión, proporcionales al nivel de reemplazo. Como se muestra en la Figura 2, cada 1% de aumento en EPP redujo la resistencia en 0.574 MPa. La mayor disminución se presentó en la mezcla con 100% EPP, que alcanzó 22 MPa a los 56 días. Cabe destacar que esta mezcla cumplió con el requisito estructural mínimo del código ACI 318-19 de 17 MPa a los 7 días, lo que valida su viabilidad para aplicaciones estructurales a pesar de la reducción en resistencia.

3.2 Módulo de elasticidad

A los 56 días, la mezcla de referencia (0% EPP) alcanzó un módulo estático de elasticidad de 72.3 GPa, la incorporación de EPP provocó reducciones significativas, con valores promedio de 50.1, 29.9, 23.6 y 15.1 GPa para sustituciones del 30%, 55%, 80% y 100%, respectivamente. Como se muestra en la Figura 2, el módulo disminuyó de manera lineal, con una reducción promedio de 0.57 GPa por cada 1% de reemplazo de calcita por EPP.

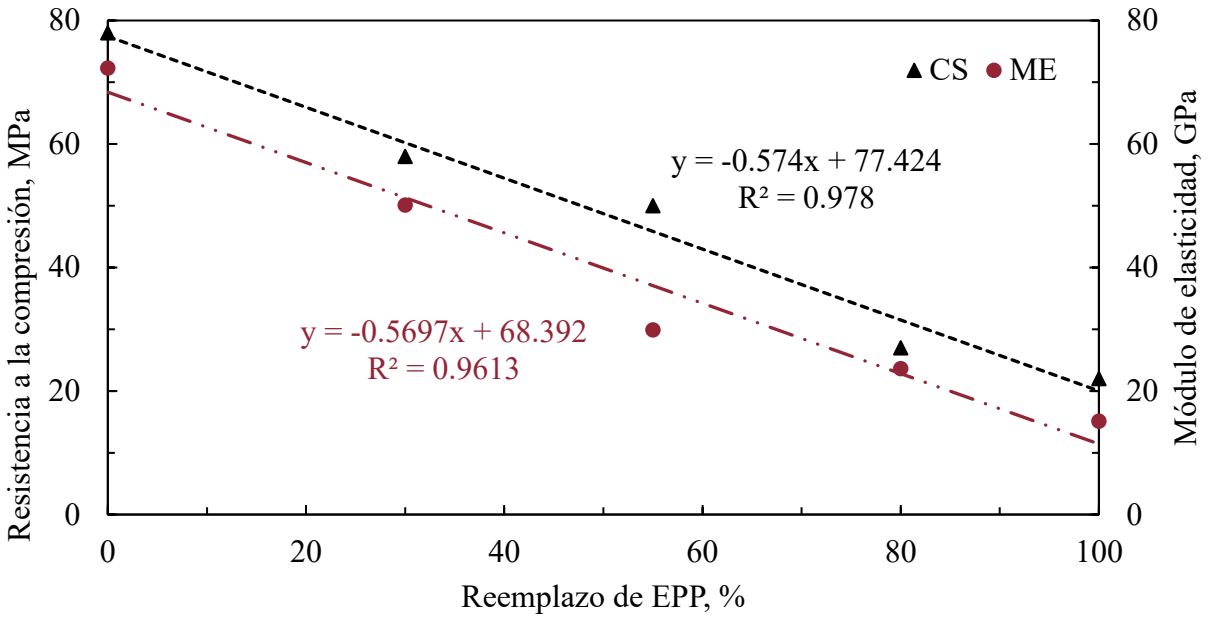
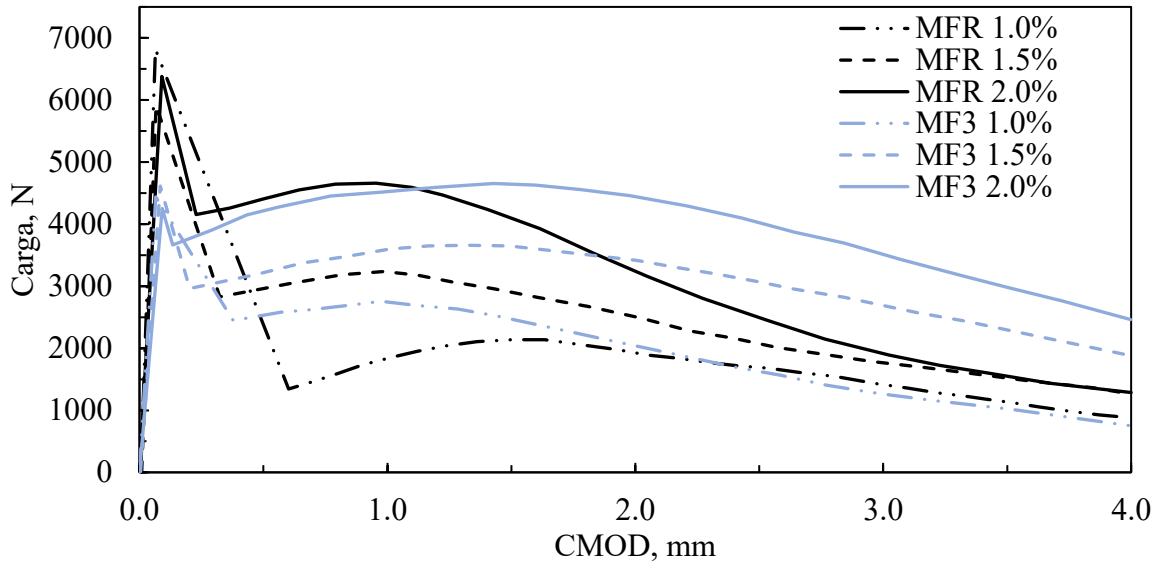


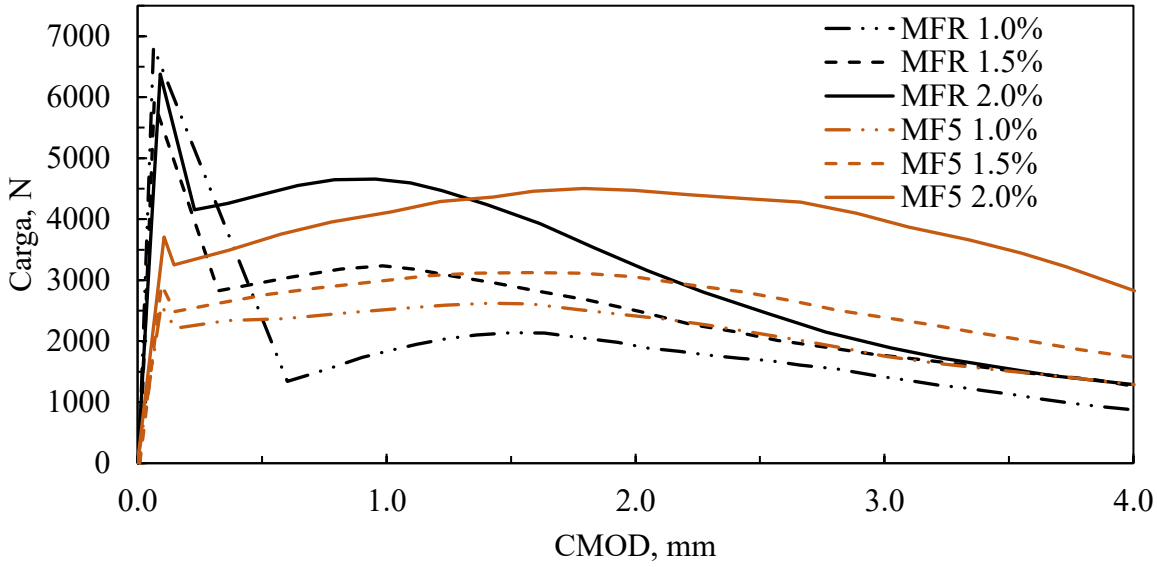
Figura 2. Efecto de las adiciones de EPP en la resistencia a la compresión (CS) y módulo de elasticidad estático (ME).

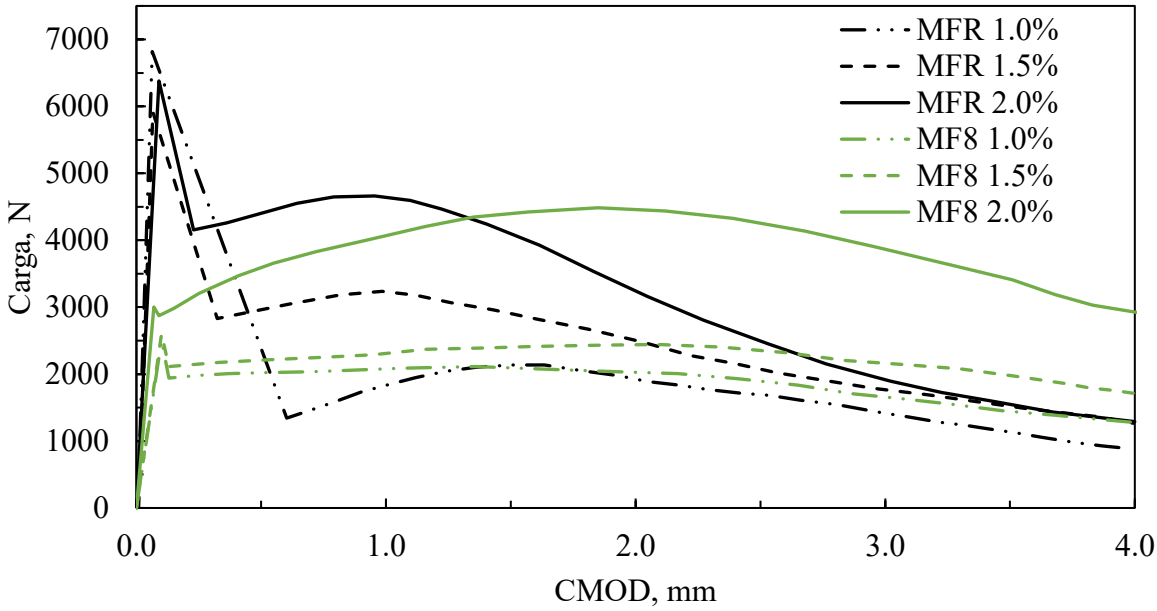
3.3 Resistencia a la flexión

En la construcción moderna, el concreto hidráulico puede diseñarse con resistencias a la compresión entre 20 y 200 MPa, lo que lo hace apto para una amplia variedad de aplicaciones. Sin embargo, una de sus principales debilidades es su baja resistencia a la tensión, la cual suele mitigarse mediante el uso de varillas de acero, barras de FRP o fibras metálicas/sintéticas. Debido a la ultra-alta resistencia del UHPC, la matriz cementante ofrece mejor capacidad de adherencia con estos refuerzos, optimizando su desempeño, en particular el de las fibras, como se ilustra en la Figura 3.

Durante la etapa de esfuerzos residuales tras la aparición de la primera fisura, pueden observarse dos tipos de comportamiento conocidos como: ablandamiento por deformación, típico en concretos convencionales reforzados con fibras, y endurecimiento por deformación, característico de concretos de alta resistencia reforzados con fibras. La mecánica de fractura involucrada depende de factores como el tipo de fibra, el volumen dosificado, la relación de aspecto y la adherencia con la matriz. En este sentido, al tratarse de concretos de ultra-alta resistencia, las curvas carga–deformación presentadas en la Figura 3 muestran tres fases claramente diferenciadas: la primera fase muestra la carga máxima correspondiente a la primera fisura, en la segunda fase inicia una etapa de endurecimiento por deformación atribuible a la acción sinérgica entre fibras y matriz en el plano de la fisura inducida; y la tercera fase el inicio cuando la segunda fase termina y en el cual, el esfuerzo es principalmente conducido por la resistencia de los filamentos de la fibra que cierran la fisura, y el módulo de elasticidad del material constituyente de las mismas.


MFR 1.0%
MFR 1.5%
MFR 2.0%
MF3 1.0%
MF3 1.5%
MF3 2.0%
Carga, N
CMOD, mm
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0


MFR 1.0%
MFR 1.5%
MFR 2.0%
MF5 1.0%
MF5 1.5%
MF5 2.0%
Carga, N
CMOD, mm
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0


MFR 1.0%
MFR 1.5%
MFR 2.0%
MF8 1.0%
MF8 1.5%
MF8 2.0%
Carga, N
CMOD, mm
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
7000
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0

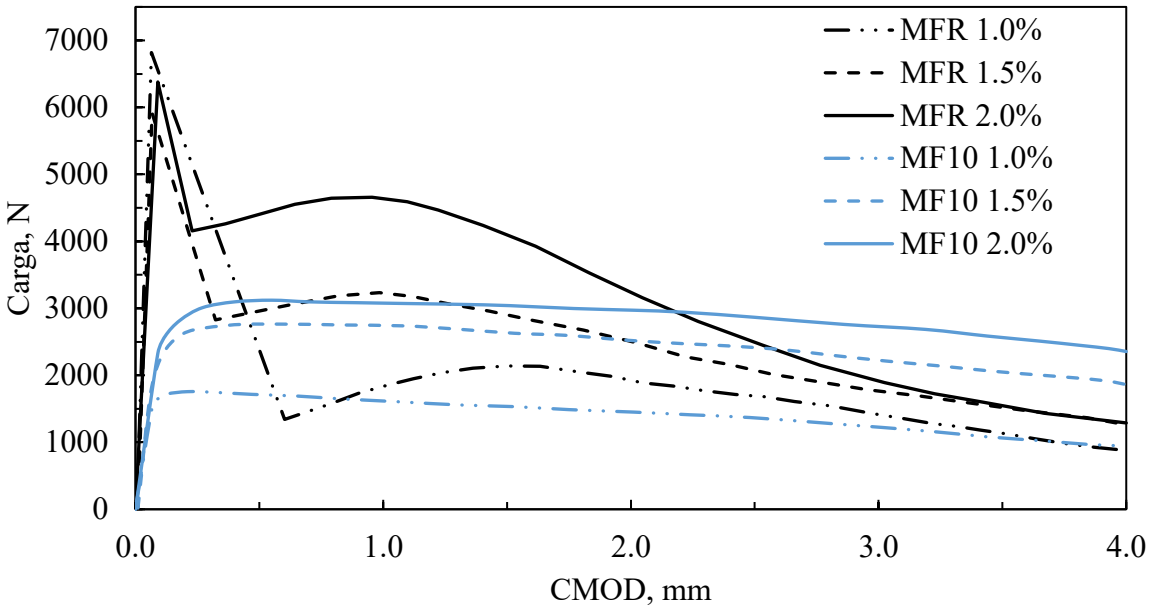


Figura 3. Curvas Carga-CMOD de L-UHPC con: a) 30%, b) 55%, c) 80% y d) 100% de reemplazo EPP.

La Figura 3 y la Tabla 3 presentan las comparaciones del desempeño a flexión entre la mezcla de referencia (R, 0% EPP) y las cuatro mezclas con sustituciones de calcita por EPP (MF3, MF5, MF8 y MF10). Para las tres dosificaciones de fibras (1.0, 1.5 y 2.0% en volumen), las cargas promedio correspondientes a la primera fisura ocurrieron en valores de CMOD de 0.06–0.11 mm. El promedio de las cargas en la primera grieta fue de 6,371 N (R, 0% EPP), 4,434 N (MF3, 30% EPP), 3,074 N (MF5, 55% EPP), 2,232 N (MF8, 80% EPP), y 1,858 N (MF10, 100% EPP), con variaciones de ±450 N, ±180 N, ±500 N, ±155 N, y ±165 N, respectivamente. Estos resultados mostraron reducciones progresivas de 30%, 52%, 64%, y 71% para MF3, MF5, MF8, y MF10 comparadas con la mezcla de referencia (R), directamente atribuible a la nula contribución en la resistencia a la compresión de la EPP.

Para las dosificaciones de 1.0% de fibra, las cargas correspondientes al final de la etapa de endurecimiento por deformación muestran un comportamiento superior para las mezclas MF3, MF5 y MF8, que presentaron resultados superiores a los presentados por la mezcla de referencia, con incrementos del 29.0 %, 23.0 % y 1.7 %, respectivamente. Por otro lado, la mezcla M10 presentó una disminución del 17.8 %. En esta etapa de la prueba y para esta dosificación de fibra, se puede observar en las gráficas que las deformaciones presentan valores de CMOD que se sitúan entre 0.21 y 1.72 mm.

Para la dosificación de fibra del 1.5 % y en relación con la mezcla de referencia, las cargas correspondientes al final de la etapa de endurecimiento por deformación muestran un rendimiento superior del 13.14 % solo para la mezcla MF3, ya que las mezclas MF5, MF8 y MF10 presentaron reducciones del 3.4, 34.9 y 14.6 %, respectivamente. En esta etapa de la prueba y para esta dosificación de fibra, estos gráficos muestran que las deformaciones presentan valores CMOD entre 0.62 y 1.58 mm.

Tabla 2. Comparativa de diferentes puntos de la gráfica en diferentes reemplazos de EPP.

% de EPP	ID Mezcla	A		B		C	
		P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm
0 (Referencia)	MFR 1.0%	6818	0.06	2135	1.50	882	4.00
	MFR 1.5%	5915	0.07	3235	0.98	1262	
	MFR 2.0%	6379	0.09	4660	0.95	1288	
30 %	MF3 1.0%	4439	0.07	2754	0.97	749	4.00
	MF3 1.5%	4613	0.08	3660	1.32	1881	
	MF3 2.0%	4250	0.09	4654	1.43	2462	
55 %	MF5 1.0%	2589	0.09	2623	1.41	1289	4.00
	MF5 1.5%	2925	0.10	3124	1.58	1741	
	MF5 2.0%	3707	0.11	4503	1.79	2825	
80 %	MF8 1.0%	2486	0.10	2172	1.72	1255	4.00
	MF8 1.5%	2177	0.11	2106	1.53	1487	
	MF8 2.0%	2300	0.07	4485	1.85	2921	
100 %	MF1 1.0%	1667	0.07	1756	0.21	947	4.00
	MF1 1.5%	1904	0.07	2763	0.62	1855	
	MF1 2.0%	2003	0.09	3122	0.55	2355	

Para la dosis de fibra del 2.0 % y en relación con la mezcla de referencia, las cargas correspondientes al final de la etapa de endurecimiento por deformación muestran un rendimiento inferior para las mezclas MF3, MF5, MF8 y M10, ya que presentaron reducciones del 0.13, 3.40, 3.76 y 33.00 %. En esta etapa de la prueba y para esta dosificación de fibra, estos gráficos muestran que las deformaciones presentan valores de CMOD que se encuentran entre 0.55 y 1.85 mm.
Para la dosificación de fibra del 1.0 % y para un CMOD de 4 mm, las cargas correspondientes al final de la etapa de ablandamiento por deformación fueron un 15.08 % menores para la mezcla MF3, y un 46.15, 42.49 y 7.37 % mayores para las mezclas MF5, MF8 y MF10, respectivamente.
Para la dosificación de fibra del 1.5 % y para un CMOD de 4 mm, en todos los casos las cargas correspondientes al final de la etapa de ablandamiento por deformación fueron superiores en un 49.05, 37.96, 17.83 y 46.99 %, para las mezclas MF3, MF5, MF8 y MF10, respectivamente. En cuanto a la dosificación de fibra del 2.0 % y para un CMOD de 4 mm, al final de esta etapa, en relación con la mezcla de referencia correspondiente, los incrementos fueron del 91.15, 119.33, 126.79 y 82.84 %, para las mezclas MF3, MF5, MF8 y MF10, respectivamente. Estos incrementos representan un aumento significativo de la capacidad de absorción de energía cuando el material está sometido a tensiones de flexión, un beneficio atribuido principalmente a las fibras.

3.4 Resistividad Eléctrica Superficial y Volumétrica (SER y BER)

La resistividad eléctrica es un parámetro clave de durabilidad que refleja el nivel de densificación de la matriz cementante, cuanto más densa es la matriz, mayor es la resistividad y, en consecuencia, mayor es la resistencia frente a agentes agresivos como cloruros, sulfatos, CO_2, humedad y otros.

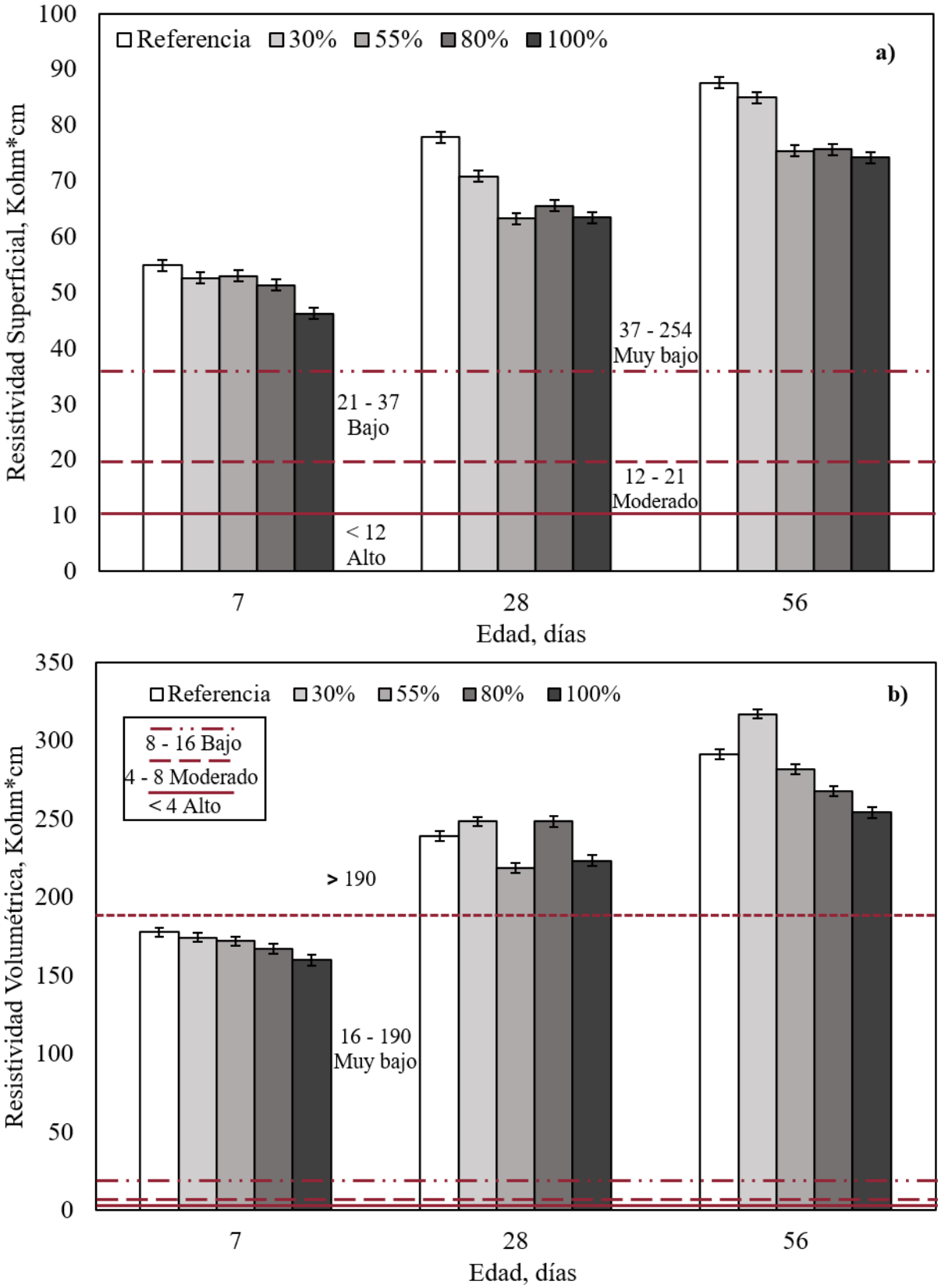


Figura 4. Resistividades eléctricas Superficial (a) y Volumétrica (b) para cinco concretos sin fibras evaluados en este trabajo.

La Figura 4 presenta los resultados de resistividad superficial (SER) y resistividad volumétrica (BER) obtenidos en especímenes cilíndricos (Ø100×200 mm). Los resultados de la SER (Fig. 4a) demostraron mínimas variaciones a lo largo de los diferentes niveles de sustitución de EPP, con valores principales de 51.6 kΩ·cm (rango: -5.4/+3.3), 68.2 kΩ·cm (rango: -4.9/+9.6), y 79.5 kΩ·cm (rango: -5.4/+8.0) a los 7, 28, y 56 días respectivamente. Estos resultados confirman que el reemplazo de la calcita por EPP (0-100% vol.) tiene efectos insignificantes estadísticamente ($p>0.05$) en la SER, mostrando de manera consistente muy baja susceptibilidad a la penetración de ion cloro en todas las mezclas ($37<SER\leq254$ kΩ·cm) por la clasificación de la ASTM C1876 (AASHTO TP 95, 2014).

De manera similar, las mediciones de la BER (Fig. 4b) muestran estabilidad comparable, registrando valores de 170.3 kΩ·cm (rango: -10.3/+7.4), 235.5 kΩ·cm (rango: -16.9/+12.8), y 282.4 kΩ·cm (rango: -28.1/+34.6) a las edades equivalentes. Con estrechas desviaciones estándar (±<15% de valores medios) y la clasificación como riesgo de penetración insignificante (BER>190 kΩ·cm) (Zulkarnain y Ramli, 2008) corroboran aún más que la incorporación de EPP mantiene la microestructura densa característica de los sistemas UHPC.

3.5 Conductividad térmica

Además de la reducción del peso unitario del concreto, el uso de agregados ligeros en el concreto también conduce a una reducción de la conductividad térmica del material. Por este motivo, en este trabajo se determinó esta propiedad en concretos con y sin fibras para determinar tanto el efecto de la EPP dosificado en diferentes cantidades, como también el efecto de la fibra sintética.

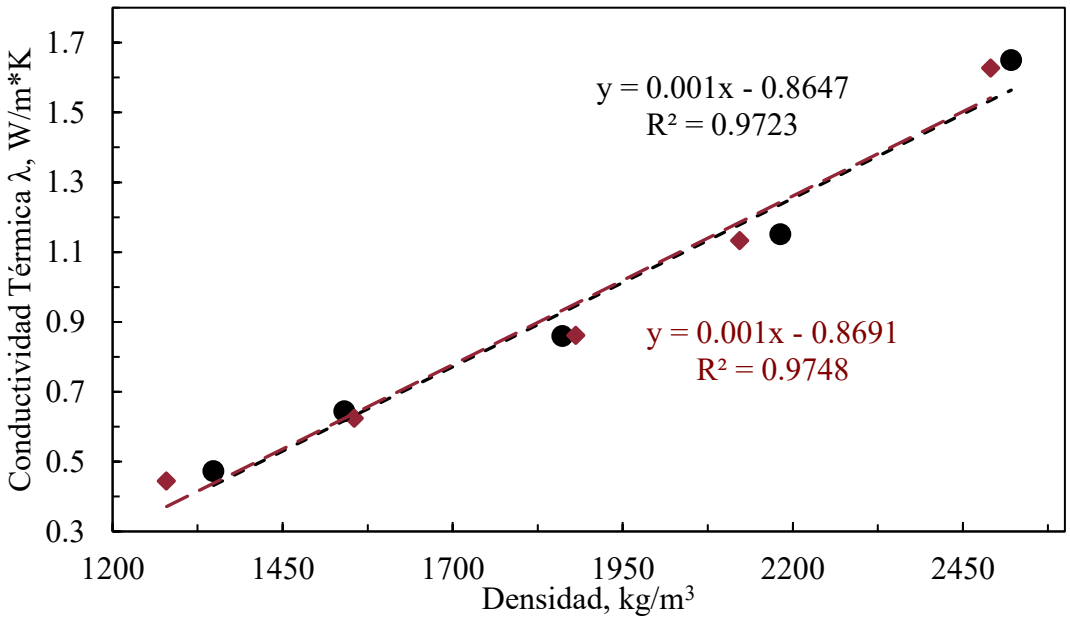


Figura 5. Influencia de los diferentes porcentajes de EPP en la conductividad térmica.

Como se puede observar en la Figura 5, la conductividad térmica tiene una muy buena correlación con la densidad del concreto y disminuye a medida que el peso volumétrico del concreto disminuye, a una tasa de 1 × 10-3 por cada kg/m^3 de concreto. También podemos observar que los resultados para los concretos con fibra fueron prácticamente los mismos que los de los concretos sin fibra, ya que presentaron la misma tasa de disminución de la conductividad térmica en relación con la disminución del peso volumétrico, lo que indica que, para las cantidades de fibra dosificadas, la influencia de la fibra fue insignificante.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. El rápido aumento de la resistencia a compresión observado en los primeros tres días (79–89% de la resistencia a 28 días) se atribuye al efecto sinérgico de la baja relación agua-materiales cementantes (w/cm = 0.22) y la alta reactividad del sistema cemento-metacaolín. Cabe destacar que la mezcla con 100% de EPP alcanzó 22 MPa a los 56 días, cumpliendo con el requisito estructural mínimo (17 MPa según ACI 318-19) desde los 7 días, lo que valida su idoneidad para aplicaciones prefabricadas bajo control de calidad.
2. La sustitución con EPP redujo las cargas de primera fisura entre un 30–71% (en comparación con la mezcla de referencia), pero las fibras de PVA (1.5–2.0% vol.) restablecieron eficazmente la capacidad post-agrietamiento, particularmente durante el ablandamiento por deformación. La dosificación de 1.5% de PVA mejoró la resistencia residual hasta en un 29%, demostrando su papel crítico en el mantenimiento de la integridad estructural bajo esfuerzos de flexión.
3. Los resultados de la SER (51.6–79.5 kΩ·cm) y la BER (170.3–282.4 kΩ·cm) confirmaron que la incorporación de EPP (0–100%) tuvo un impacto insignificante en la resistencia a la penetración de cloruros, clasificando a todas las mezclas como de riesgo de penetración "muy bajo" (SER) o "insignificante" (BER), según las normas ASTM/AASHTO. Esto reafirma la consistencia en durabilidad del EPP-UHPC, un indicador clave de aseguramiento de calidad.
4. La conductividad térmica mostró una correlación inversa lineal con la densidad ($\lambda = -1\times10^{-3}$ W/m·K por kg/m³, $R^2 > 0.95$), lo que permite un control de desempeño predecible para aplicaciones ligeras con propiedades aislantes. La mezcla con 30% de EPP optimizó este equilibrio (1.1 W/m·K a 1950 kg/m³).
5. Este trabajo proporciona un marco de producción de L-UHPC conforme a control de calidad, asegurando el cumplimiento de criterios mecánicos (ACI 318-19), de durabilidad (ASTM C1876) y de desempeño térmico para elementos híbridos arquitectónico-estructurales.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Filiberto Marín López, de EUCOMEX, por la donación de los aditivos SP y STA; a Humberto Cantú, de KURARAY México, por la donación de las fibras de PVA; y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por la beca otorgada a Jorge Xilotl para que pudiera realizar sus estudios de maestría con énfasis en materiales de construcción en la UANL.

6. REFERENCIAS

Abu, Y., Sulaiman, D., Akeed, M., Qaidi, S., Tayeh, B. (2022). *Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete.* Case Studies in Construction Materials, Volume 17, e01234, ISSN 2214-5095, https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01234.

Akeed, M., Qaidi, S., Ahmed, H., Faraj, R., Mohammed, A., Mahmood, W., Tayeh, B., Azevedo, A. (2022). *Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part IV: Durability properties, cost assessment, applications, and challenges.* Case Studies in Construction Materials. 17. e01271. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01271.

Alkadhim, H. A., Amin, M. N., Ahmad, W., Khan, K., Umbreen-us-Sahar, Al-Hashem, M. N., Mohamed, A. (2022) *An overview of progressive advancement in ultra-high performance concrete with steel fibers.* Front. Mater. 9:1091867. doi: https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1091867

Andrade, C., D'Andrea, R. (2011). *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad.* Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 1(2), 93-101.

AASHTO TP 95 (2014), "*Standard Test Method for Surface Resistivity of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration,*" American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 10 pp.

Azmee, N. M., Shafiq, N. (2018). *Ultra-High-Performance Concrete: From Fundamental to Applications.* Case Studies in Construction Materials. doi: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197

Badogiannis, E., Maria, S., Konstantinos, A., Alexandros, C. (2021). *Durability of Structural Lightweight Concrete Containing Different Types of Natural or Artificial Lightweight Aggregates.* Corrosion and Materials Degradation 2, no. 4: 554-567. https://doi.org/10.3390/cmd2040029.

Bozorgmehr, S., Nemati, M. (2023). *Applied development of sustainable-durable high-performance lightweight concrete: Toward low carbon footprint, durability, and energy saving,* Results in Materials, Volume 20, 100482, ISSN 2590-048X, https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100482.

Chung, S.-Y., Sikora, P., Kim, D. J., El Madawy, M. E., Abd Elrahman, M. (2021). *Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete.* Materials Characterization, 173, 110907. doi: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110907.

Dixit, A., Pang, S. D., Kang, S.-H., Moon, J. (2019). *Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPP) for enhanced thermal insulation.* Cement and Concrete Composites. doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023

Dong, Y. (2018). *Performance assessment and design of ultra-high-performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts.* Construction and Building Materials, 167, 414–425. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.037

Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Wang, H. (2021). *New development of ultra-high-performance concrete (UHPC).* Composites Part B: Engineering, 224, 109220. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220

FM 5-578 (2004), "*Florida Method of Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability*", Florida, U.S.A

Gasparri, E., Brambilla, A., Lobaccaro, G., Goia, F., Andaloro, A. Sangiorgio, A. (2022). *Rethinking Building Skins - Facade Tectonics Institute*

Gong, J., Ma, Y., Fu, J., Hu, J., Ouyang, X., Zhang, Z., Wang, H. (2022). *Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review. Composites Part B: Engineering.* Volume 241, 109995, ISSN 1359-8368, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109995.

Habil, M., Fehling, E. (2005). *Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe.* ACI Special Publication. 228.

Huang, H., Teng, L., Gao, X., Khayat, K., Wang, F., Liu, Z. (2022). *Use of saturated lightweight sand to improve the mechanical and microstructural properties of UHPC with fiber alignment.* Cement and Concrete Composites, Volume 129, 104513, ISSN 0958 9465, https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104513.

Kishore, M., Yadav, H., Garg, A. (2015). *Architectural Use of Precast Ultra High-Performance Concrete.* International Journey of Scientific Research. ISSN 2277 – 8179

Le, A., Ekkehard, F. (2017). *Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete.* Construction and Building Materials. 153. 790-806. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.130.

Li, Y., Zhan, G., Yang, J., Ding, Y., Ding, Q., Wang, Y. (2022). *Chloride Ion Transport Properties in Lightweight Ultra-High-Performance Concrete with Different Lightweight*

Aggregate Particle Sizes. Materials 15, no. 19: 6626. https://doi.org/10.3390/ma15196626.
Lu, J., Shen, Pe., Ali, H., Poon, C. (2022). Mix design and performance of lightweight ultra-high-performance concrete. Materials & Design. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110553
Market Research Report (2023). *Trends in the Façade Systems Market - Coherent Market Insights Code: CMI6229.* Recuperado de: https://www.coherentmarketinsights.com/industry-reports/facade-systems-market
Mazzacane, P., Ricciotti, R., Lamoureux, G., Corvez, D. (2013). *Roofing of the stade Jean Bouin in UHPFRC.* In Proceedings of international Symposium on ultra-high performance fibre-reinforced concrete (pp. 59-68)
Meng, W., Khayat, K. (2017). *Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete.* Cement and Concrete Research, 101, 46–54. doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.018
Noushini, A. Samali, B., Vessalas, K. (2013). *Flexural Toughness and Ductility Characteristics of Polyvinyl Alcohol Fibre Reinforced Concrete (PVA-FRC).* Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS 2013. 1110-1121.
Perry V. (2018). *What really is ultra-high performance concrete – towards a global definition.* In: Proceedings of the 2nd international conference on UHPC materials and structures. Fuzhou: RILEM Publications.
Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z. (2015). *A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design.* Construction and Building Materials, 101, 741–751. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088
Siwinski, J., Szczeniak, A., Stolarski, A. (2020). *Modified Formula for Designing Ultra-High-Performance Concrete with Experimental Verification*. MDPI Journal Materials, Materials, 13, 4518. https://doi.org/10.3390/ma13204518
Soliman, N. A., Tagnit-Hamou, A. (2017). *Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap*. Construction and Building Materials, 139, 374–383. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.084
Thienel, K.-C., Haller, T., Beuntner, N. (2020). *Lightweight Concrete – From Basics to Innovations.* Materials, 13, 1120. https://doi.org/10.3390/ma13051120
Umbach, C., Wetzel, A., Middendorf, B. (2021). *Durability Properties of Ultra-High Performance Lightweight Concrete (UHPLC) with Expanded Glass.* Materials 14, no. 19: 5817. https://doi.org/10.3390/ma14195817.
Wang, X., Wu, D., Geng, Q., Hou, D., Wang, M., Li, L., Wang, P., Chen, D., Sun, Z. (2021). *Characterization of sustainable ultra-high-performance concrete (UHPC) including expanded perlite.* Construction and Building Materials, 303, 124245. doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124245
Weina, M., Samaranayake, V., Khayat, K. (2018). F*actorial design and Optimization of Ultra-High-Performance Concrete with Lightweight Sand.* ACI materials Journal. ResearchGate. DOI: https://doi.org/10.14359/51700995
Wetzel, A., Umbach, C., Ekkehard, F., Middendorf, B. (2016). *Multifunctional prefabricated walls made of UHPC and foam concrete.*
Yang, J., Chen, B., Su, J., Xu, G., Zhang, D., Zhou, J. (2022). *Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 9, Issue 3, Pages 363-387, ISSN 2095-7564, https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.001.
Zulkarnain, F., Ramli, M. (2008). *Durability performance of lightweight aggregate concrete for housing construction. 2nd international conference on built environment in developing countries.* Recuperado de: https://core.ac.uk/download/pdf/83543337.pdf