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

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

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

Recebido: 17/09/2024 | Correções recebidas: 29/05/2025 | Aceito: 13/05/2025 | Publicado: 01/09/2025

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; desempenho térmico; resistividade elétrica; fibras de PVA.

Citar como: Xilotl-Domínguez, J., Durán-Herrera, A., López-Yépez, L., Muñoz-Espinoza, A. (2025), "*Desenvolvimento de concreto leve de ultra alto desempenho para aplicações arquitetônicas.*", 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.

Contribuição de cada autor
Neste trabalho, o autor Xilotl-Dominguez contribuiu com a atividade do desenvolvimento experimental e o primeiro esboço da escrita, o autor Duran-Herrera (80%) e López-Yépez (20%) com a atividade do desenvolvimento teórico da abordagem experimental e norteador do artigo, bem como a ideia original, redação do trabalho, discussão dos resultados, entre outros. O autor Muñoz-Espinoza colaborou contribuindo com materiais na parte experimental e contribuições sobre as metodologias a serem seguidas.

Licença Creative Commons
Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação
Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2026.

© 2025 ALCONPAT Internacional

Development of lightweight ultra high performance concrete to architectural applications.

ABSTRACT

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

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

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria da construção, foram propostos inúmeros materiais e tecnologias para melhorar os processos de construção e otimizar o uso do material. Nesse sentido, os concretos de ultra alto desempenho (também conhecidos como UHPC) são aqueles concretos com características notáveis em termos de resistência à compressão, durabilidade e ductilidade. Esses concretos surgiram na década de 1980 como uma solução para a busca por alta durabilidade através da implementação de modelos de compactação, que permitem reduzir a porosidade aumentando a densificação da matriz de cimento, o que os torna altamente duráveis contra vários agentes externos potenciais de deterioração. Atualmente, entre as aplicações em que esses concretos estão sendo amplamente utilizados, as aplicações arquitetônicas estão se tornando cada vez mais proeminentes, devido à sua versatilidade na adoção de formas, texturas, acabamentos, etc.

O UHPC é um material que tem atraído o interesse da indústria de pesquisa e construção, pois pode satisfazer algumas questões, como elementos esguios, alta durabilidade e vida útil de mais de 100 anos (Azmee e Shafiq, 2018; Badogiannis, et al. 2021), bem como ductilidade devido à incorporação de fibras de aço (Alkadhim, et al. 2022).

Os UHPCs são um material composto cimentício que apresenta propriedades de resistência à compressão, ductilidade e durabilidade melhoradas em comparação com o HPC. Os UHPCs podem conter fibras para ductilidade pós-fissuração (Andrade e Andrade, 2011). Os UHPCs são concretos que têm, no mínimo, uma resistência à compressão ≥ 120 MPa curados em condições normais, e resistência ≥ 150 MPa quando curados a vapor, e uma resistência à tração ≥ 5 MPa (Badogiannis, et al. 2021).

Da mesma forma, eles têm baixas relações água/aglutinante (0,15-0,25), alta compactação da matriz (0,825-0,855), altos volumes de fibras de aço (≥ 2%) e, para sua produção, é obrigatório o uso de um aditivo redutor de água de alta gama ou superplastificante para proporcionar alta fluidez à mistura (≥ 160 mm no minicone) (Badogiannis, et al. 2021).

O concreto leve (LC) apresenta propriedades distintas em comparação com o concreto convencional e o UHPC, incluindo menor densidade (normalmente 1.200–1.800 kg/m³) e melhor isolamento térmico/acústico. As principais aplicações estruturais incluem lajes, preenchimentos de paredes e painéis de revestimento, onde seu peso reduzido diminui as cargas mortas e melhora a resistência ao fogo (Thienel, et al. 2020).

No entanto, o concreto leve é caracterizado por sua baixa resistência à compressão e, às vezes, menor durabilidade, devido ao uso de agregados leves, aditivos espumantes ou inclusões de ar. Portanto, substituir a matriz cimentícia típica por uma matriz UHPC pode ser uma ideia atraente para explorar os pontos fortes de ambas as tecnologias.

O concreto ultraleve de ultra alto desempenho (também conhecido como L-UHPC) é a combinação de um UHPC convencional com a incorporação de agregados leves, resultando em propriedades melhoradas, pelo que deve manter propriedades e características como alta compactação da matriz e baixa relação água/cimento (≤0,25), o que permite manter as propriedades de durabilidade mesmo com uma redução da resistência. Da mesma forma, as faixas de densidade comparáveis para um L-UHPC podem variar entre 1500 e 2000 kg/m^3(Badogiannis, et al. 2021: Li, et al. 2022).

Os L-UHPCs mantêm a matriz principal de um UHPC, com a substituição do agregado de peso normal por um agregado leve. Os principais agregados utilizados na sua fabricação são argila expandida, esferas de vidro expandido, microesferas de cinza volante e perlita de poliestireno expandido (EPP) (Shi, et al. 2018). Da mesma forma, existem diferentes fibras utilizadas nos UHPCs convencionais, sendo as mais comuns geralmente o aço, devido às suas propriedades de resistência à tração, que apresentam alta ductilidade (Shi, et al. 2018; Yang, et al. 2022). No entanto, também são utilizadas outras fibras, como álcool polivinílico (PVA), vidro (G), polietileno

(PE) e polipropileno (PP) (Shi, et al. 2018; Yang, et al. 2022; Abu, et al. 2022; Le e Fehling, 2017; Gong, et al. 2022).

Em um esforço para reduzir os custos de manutenção, bem como para proporcionar maior durabilidade, longa vida útil da estrutura e simplificar a construtibilidade, projetos em todo o mundo têm buscado incorporar critérios de durabilidade na construção de infraestruturas. Portanto, para projetos que exigem um material durável, forte e dúctil, os UHPCs podem ser a alternativa de escolha (Yang, et al. 2022; Habil e Fehling, 2005).

As principais aplicações dos UHPCs variam de componentes estruturais, pontes, elementos arquitetônicos, reparos e reabilitação a componentes verticais para torres eólicas. No entanto, os usos e aplicações não são limitados e podem incluir reforço estrutural, retrofit, elementos pré-fabricados e outras aplicações exclusivas (Akeed, et al. 2022).

Além disso, as propriedades mecânicas superiores do UHPC permitem o projeto e a fabricação de componentes de construção esguios, leves e esteticamente agradáveis. Por exemplo, o Museu das Civilizações Europeias e Mediterrâneas, o primeiro edifício a fazer uso extensivo do UHPC, foi construído em 2013 em Marselha, França (Du, et al. 2021). Alternativamente, o estádio Jean Bouin, em Paris, que tem 11.000 m^2 de painéis de concreto reforçado com fibra de ultra alta performance (UHPFRC) nas laterais e 10.000 m^2 no telhado (Mazzacane, et al. 2013).

Alguns autores desenvolveram L-UHPC com diferentes finalidades, sendo as principais devido ao uso de agregados de regiões locais para reduzir o custo do produto final (Wang, et al. 2021) e para melhorar o coeficiente de condutividade térmica (Dixit, et al. 2019).

Este trabalho desenvolve UHPC incorporado com EPP para fachadas arquitetônicas que exigem resistência <120 MPa, mas com durabilidade e ductilidade aprimoradas. O sistema reforçado com fibra PVA resiste a cargas de vento e degradação ambiental, evitando a corrosão da fibra de aço (Kishore, et al. 2015).

Neste trabalho, foram avaliadas cinco séries de concretos com substituições de areia calcária por diferentes porcentagens de EPP em volume (0, 30, 55, 80 e 100%) e a incorporação de PVA. Para avaliar o efeito sinérgico do EPP e do PVA em uma matriz cimentícia UHPC, foram examinadas as seguintes propriedades: resistência à compressão, resistência à flexão, resistividade elétrica superficial, resistividade elétrica volumétrica e condutividade térmica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Para a produção do concreto neste estudo, foi utilizado: cimento Portland branco misturado (CPC 30R B, em conformidade com NMX-C-414); metacaulim (GCC-METAFORCE); areia de calcita (tamanho máximo de partícula 4,76 mm, peneira #4); enchimento de calcita (tamanho médio das partículas 5,91 µm, proveniente do nordeste do México); perlita de poliestireno expandido (EPP, tamanho máximo das partículas 1 mm); e fibras sintéticas estruturais de PVA (KURALON K-II) projetadas especificamente para aplicações em UHPC. As fibras de PVA, com dimensões médias de filamento de 12 mm de comprimento e 200 µm de diâmetro, foram incorporadas em 1,0%, 1,5% e 2,0% em volume para determinar a dosagem ideal por meio de testes de flexão de vigas.

Para obter uma alta fluidez, foi utilizado um aditivo redutor de água ou superplastificante de alto alcance à base de éter policarboxilato (SP, FLOWCON P01) e, para melhorar a densidade de empacotamento das partículas, foi utilizado um estabilizador para diminuir a perda de consistência (STA, EUCON WORKONTROL), bem como um aditivo excludente de ar (EX, HDS ISODENSE 250). Outras propriedades físicas dos materiais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela1 . Propriedades físicas complementares dos materiais.

ID	Material	Densidade, g/cm^3	Absorção, %	d_{50}, µm	Comprimento, mm	Diâmetro, mm	Teor de sólidos, %
CPC	Cimento Portland	3,02	-----	18,16	-----	-----	-----
MK	Metacaulim	2,58	-----	16,66	-----	-----	-----
FA	Agregado fino	2,65	0,80	416,50	-----	-----	-----
F	Enchimento	2,67	-----	5,91	-----	-----	-----
EPP	Micro poliestireno expandido perlita	5,5 x 10^{-2}	0,00	-----	-----	< 1,0	-----
PVA	Fibra de álcool polivinílico	1,30	-----	-----	12	0	-----
SP	Mistura de HRWRA/SP.	1,1	-----	-----	-----	-----	50,12
STA	Aditivo estabilizador.	1,10	-----	-----	-----	-----	40,00
EX	Aditivo para exclusão de ar.	0,98	-----	-----	-----	-----	35,00

3. METODOLOGIA

Para uma relação água/material cimentício (a/*cm*) fixa de 0,22, o processo de otimização para estabelecer as proporções da mistura de referência, para uma resistência à compressão mínima de 120 MPa e um abatimento alvo de 80 ± 25 cm, foi determinado de acordo com o procedimento padrão. Conforme descrito na norma ASTM C1611-21, foram preparadas as seguintes dosagens para CPC, MK, SP, STA e EX de 807,5 kg/m^3, 142,5 kg/m^3, 5,5 – 10,5 ml/kg de *cm,* 4,0 ml/kg de *cm* e 1,0 ml/kg de *cm*, respectivamente. A primeira etapa da metodologia neste trabalho foi obter a composição da mistura de concreto, as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido que foram projetadas para obter uma resistência à compressão mínima de 120 MPa em 28 dias na mistura de referência. A partir das proporções da mistura de referência, foram produzidas outras quatro misturas para avaliar o efeito do EPP dosado em substituição da areia calcária nas seguintes porcentagens em volume: 30, 55, 80 e 100%. Neste trabalho, para a avaliação dessas cinco misturas, elas foram rotuladas como R, MF3, MF5, MF8 e MF10, respectivamente.

Para atingir o abatimento alvo de 80 ± 2,5 cm para a mistura de referência, a dosagem do superplastificante (SP) foi de 9,0 mL/kg de material cimentício (cm). Essa dosagem diminuiu progressivamente com o aumento da substituição do EPP: 8,3 mL/kg *cm* (30% EPP); 7,3 mL/kg *cm* (55% EPP); 6,8 mL/kg *cm* (80% EPP); e 5,2 mL/kg *cm* (100% EPP). Essas reduções também conduziram a reduções no fluxo de abatimento dentro da faixa de 70 ± 5,0 cm. Em comparação com a mistura de referência, a incorporação de fibras de PVA aumenta em 0,5 ml/0,5% de fibra de PVA a dosagem de SP para manter o abatimento.

Para a determinação da resistência à compressão, do módulo de elasticidade estático, da resistividade elétrica superficial e volumétrica e da condutividade térmica, foram preparados cilindros com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM C192-14 e, após a preparação, mantidos em água saturada com cal em condições de

cura padrão (T = 23,0 ± 2,0 °C, UR ≥ 95%). Para a determinação da resistência à compressão, os cilindros foram testados em triplicata em uma máquina universal com capacidade de 200 toneladas, com idades de 3, 7, 28 e 56 dias, de acordo com o procedimento padrão descrito na norma ASTM C39-21, e as médias dos resultados foram utilizadas para construir os gráficos apresentados nas Figuras 1 e 2. A resistência à compressão foi determinada em triplicata.

Para a determinação do módulo de elasticidade estático, as amostras foram testadas em triplicata de acordo com a norma ASTM C469-14, e as médias dos resultados foram utilizadas para construir o gráfico apresentado na Figura 2.

Para a determinação da resistência à flexão, foram moldadas amostras prismáticas de 7,5 x 7,5 x 30,0 cm, que foram preenchidas em uma única camada e compactadas por meio de uma mesa vibratória, com a intensidade mínima de vibração e por um período de 10 segundos. Com uma idade entre 24 e 30 horas, as amostras foram desmoldadas e imersas em água saturada com cal, em condições de cura padrão (T = 23,0 ± 2,0 °C, UR ≥ 95%), até a idade de ensaio de flexão de 56 dias, seguindo o procedimento descrito na norma UNE-EN 14651-2007. Para este ensaio, foram moldadas cinco amostras para cada uma das misturas de concreto, e as curvas médias são apresentadas na Figura 3.

A resistividade superficial e a resistividade elétrica volumétrica foram determinadas aos 7, 28 e 56 dias, seguindo os procedimentos descritos na AASTHO TP 95-14 e ASTM C1876-19, e as médias dos resultados foram utilizadas para construir os gráficos apresentados na Figura 4. A condutividade térmica foi determinada pelo método de calor transiente em amostras secas ao ar com 7 dias de idade, de acordo com o procedimento padrão descrito na norma ASTM D5334-2, e as médias dos resultados foram utilizadas para construir os gráficos apresentados na Figura 5. Três amostras foram moldadas para determinar a condutividade térmica e a resistividade elétrica.

As resistências residuais pós-fissuração foram determinadas por meio do ensaio de flexão das vigas reforçadas com fibra, que durante a sua preparação foram ranhuradas com uma serra de diamante no centro do vão, de acordo com o procedimento descrito na norma UNE-EN 14651-2007, através do qual foram medidos os valores de carga e as correspondentes aberturas progressivas da abertura da fissura (CMOD). O alargamento progressivo das aberturas da fissura (CMOD) foi obtido utilizando um extensômetro de clipe da marca Epsilon, modelo 3541, e uma unidade de aquisição de dados (DAQ) da marca National Instruments, que foi ligada a um computador durante o ensaio utilizando o software LabVIEW.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resistência à compressão

A principal propriedade que define se um concreto pode ser classificado como UHPC é a resistência à compressão. Nesse sentido, em seu relatório FHWA-HRt-13-060, a Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos da América estabelece que um UHPC deve ter uma resistência mínima de 120 MPa. Para este trabalho, as misturas avaliadas foram fabricadas a partir das proporções estabelecidas para um UHPC, nas quais foram utilizados cimento branco e areia e pó de calcário da região metropolitana de Monterrey, México, com os quais foram obtidas resistências à compressão de 105 e 140 MPa às idades de 28 e 56 dias. No entanto, para atender aos objetivos estéticos e tentar obter um concreto cuja cor fosse o mais branco possível, para os cinco concretos avaliados neste estudo, a areia calcária e o pó de calcário foram substituídos por uma calcita branca, que foi dosada em duas frações com os mesmos tamanhos de partículas do pó de calcário e da areia.

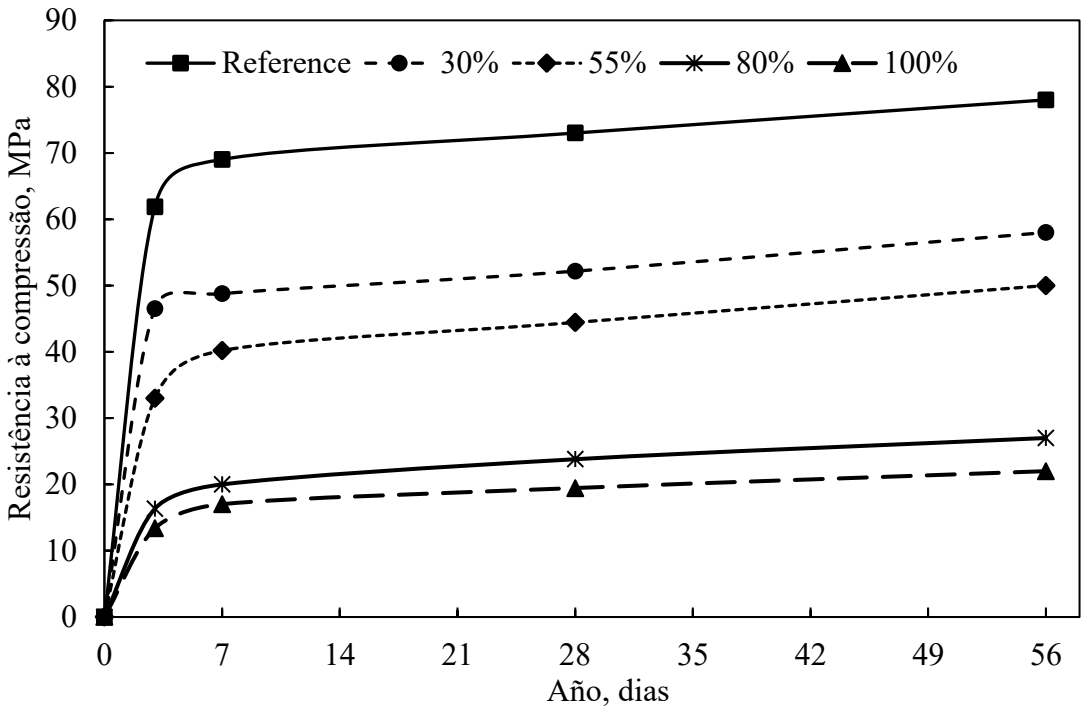


Figura1 . Desenvolvimento da resistência à compressão para misturas com teores de EPP de 0, 30, 55, 80 e 100 %, em volume, em substituição à areia e ao pó de calcita.

Para as cinco misturas avaliadas neste estudo, a figura 1 mostra a evolução da resistência à compressão até 56 dias. Todas as misturas apresentaram um desenvolvimento significativo da resistência em idade precoce, atingindo 68,5-89,1% da sua resistência à compressão aos 28 dias em apenas três dias. Este rápido ganho de resistência é atribuído à elevada reatividade inicial do cimento, combinada com a baixa relação água/cimento (a/cm = 0,22). As porcentagens de resistência em três dias em relação à resistência em 28 dias foram: 84,4% (0% EPP), 89,1% (30% EPP), 74,3% (55% EPP), 68,5% (80% EPP) e 68,7% (100% EPP). Em relação às resistências correspondentes à idade de 56 dias, esses ganhos foram de 79,4, 80,2, 66,0, 60,4 e 60,9%, respectivamente. Entre as idades de 7 e 56 dias, a Figura 1 também exibe claramente o efeito pozolânico do MK, apresentando aumentos no desenvolvimento da resistência à compressão entre essa faixa etária de 0,18, 0,19, 0,20, 0,14 e 0,10 MPa/dia.

A substituição do pó de calcita e da areia de calcita por diferentes porcentagens de EPP causou reduções significativas na resistência à compressão, que aumentaram com o aumento da porcentagem de EPP. Nesse sentido, a figura 2 indica que cada aumento de 1% na substituição do EPP reduziu a resistência à compressão em 0,574 MPa. A redução mais significativa ocorreu na mistura com 100% de EPP, que atingiu 22 MPa aos 56 dias. Notavelmente, essa mistura atendeu ao requisito estrutural mínimo da ACI 310-19 de 17 MPa em 7 dias, demonstrando sua adequação para aplicações estruturais, apesar da redução da resistência.

5. MÓDULO DE ELASTICIDADE

Em relação aos resultados obtidos para o módulo de elasticidade estático aos 56 dias (72,3 GPa), os resultados obtidos para as substituições de calcita por EPP apresentaram reduções significativas com valores médios de 50,1, 29,9, 23,6 e 15,1, para as misturas com 0, 30, 55, 80 e 100 % de EPP, respectivamente. Nesse sentido, a figura 2 indica que, para cada 1% de substituição da calcita pelo EPP, o módulo de elasticidade estático será reduzido em 0,57 GPa.

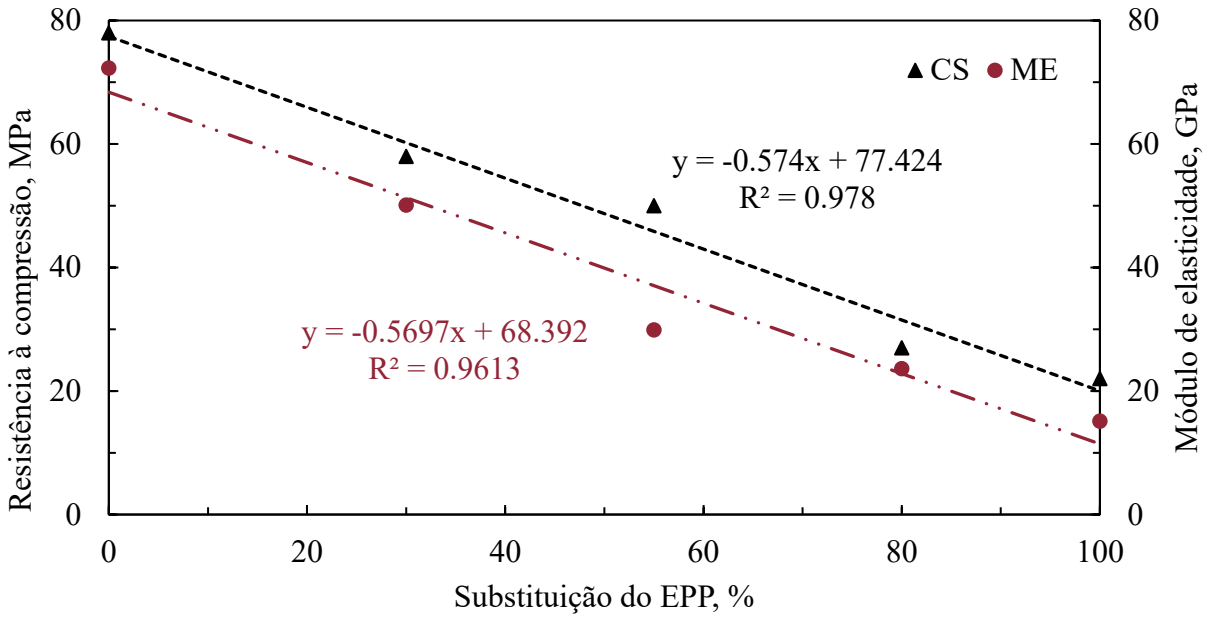
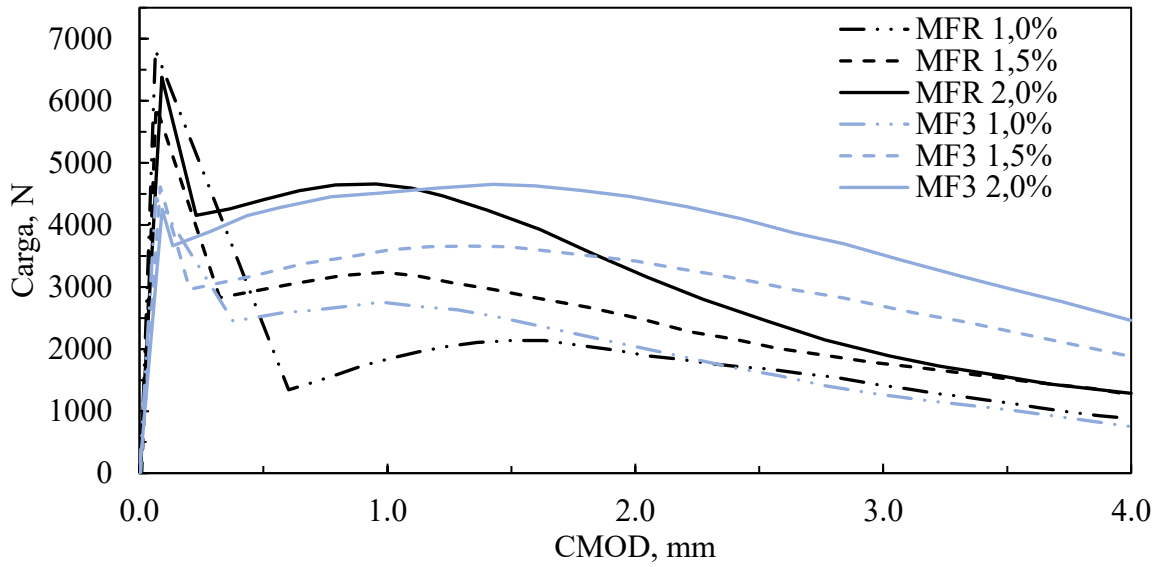


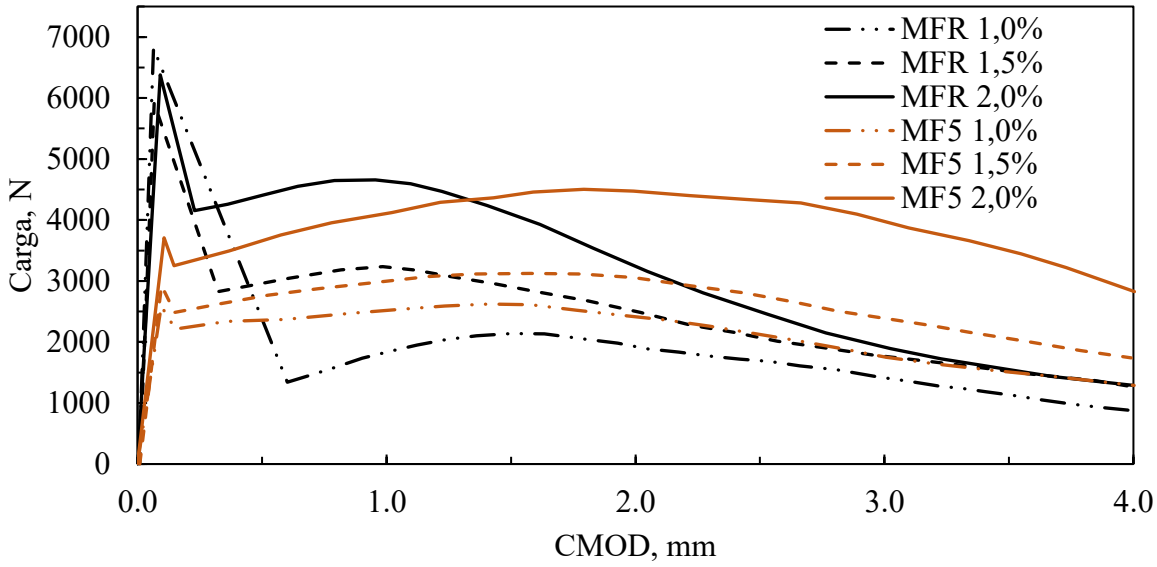
Figura 2. Efeito das adições de EPP na resistência à compressão (CS) e no módulo de elasticidade estático (ME).

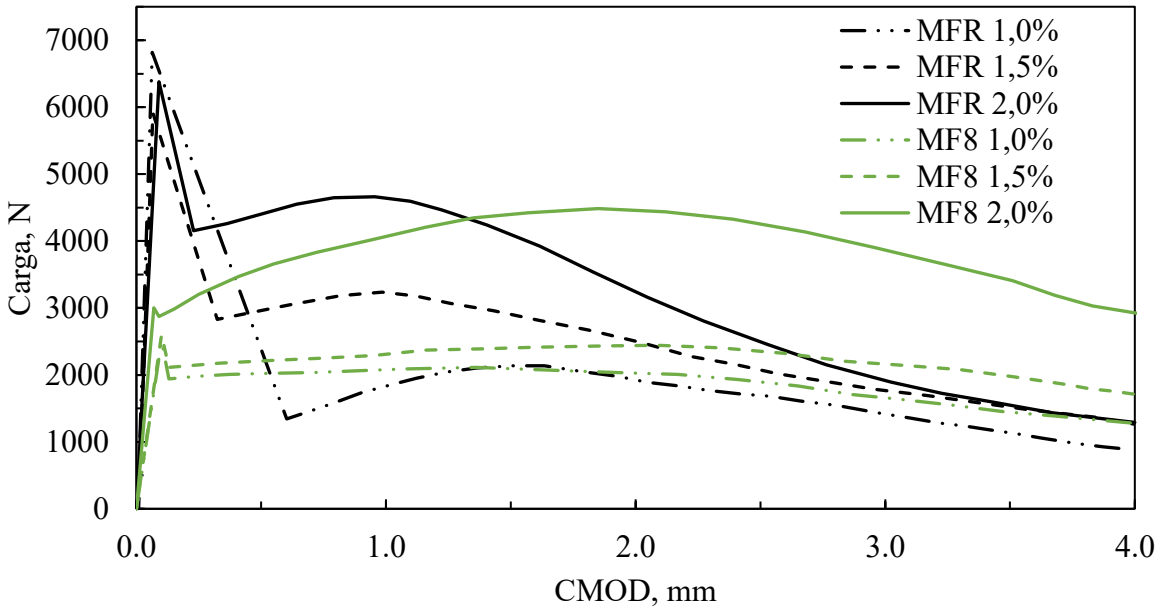
6. RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Na indústria da construção, o concreto hidráulico é um material que atualmente pode ser projetado para resistências à compressão entre 20 e 200 MPa. Essa propriedade específica é uma das qualidades positivas do material, devido às diversas aplicações em que é utilizado. No entanto, uma de suas grandes fraquezas é a resistência à tração, que geralmente é neutralizada pelo uso de barras de aço, barras de FRP e fibras metálicas ou sintéticas. Devido à ultra alta resistência do UHPC, sua matriz cimentícia oferece capacidades de ligação muito melhores com todos esses reforços, de modo que o desempenho do reforço é otimizado, como é o caso das fibras no UHPC, um benefício que podemos observar claramente na figura 3.

Na fase de tensão residual que ocorre após o concreto apresentar a primeira fissura, podem ser observados dois tipos de comportamento: o conhecido como amolecimento por deformação, típico dos concretos reforçados com fibras convencionais, e o conhecido como endurecimento por deformação, típico dos concretos de alta resistência. A mecânica da fratura envolvida nesses comportamentos depende de vários fatores da fibra, como o tipo de fibra, o volume dosado, a relação de aspecto e a adesão da fibra com a matriz cimentícia. Nesse sentido, como os concretos estudados neste trabalho de pesquisa são concretos de ultra alta resistência, nos desempenhos carga-deformação apresentados graficamente na figura 3, três estágios importantes são claramente distinguidos durante o desenvolvimento do ensaio de flexão: uma primeira fase que mostra a carga máxima quando a primeira fissura aparece; uma segunda fase que começa após o término da primeira fase e que mostra um endurecimento por deformação atribuível ao trabalho sinérgico das fibras e da matriz cimentícia, justamente no plano onde a fissura foi induzida; e uma terceira fase que começa quando a segunda fase termina e na qual a resistência é impulsionada principalmente pela resistência dos filamentos de fibra que ligam a fissura e pelo módulo de elasticidade do material de que a fibra é composta.


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

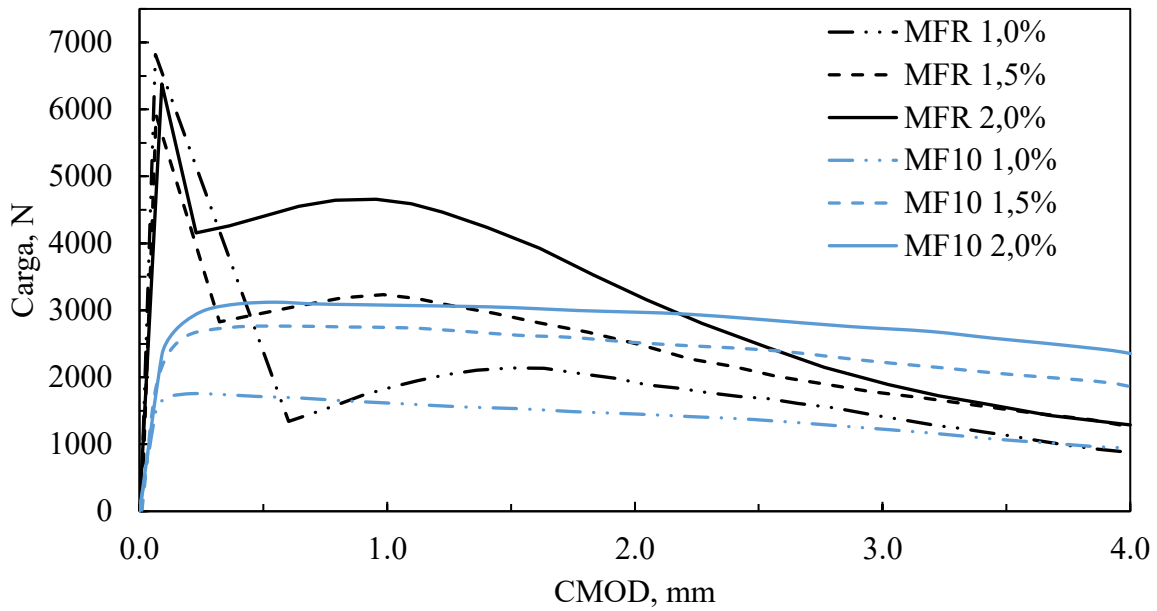


Figura 2 . Curvas de carga-CMOD do L-UHPC com: a) 30%, b) 55%, c) 80% e d) 100% de substituição de EPP.

A Figura 3 e a Tabela 3 apresentam quatro comparações entre as curvas médias obtidas através dos ensaios de flexão para a mistura R e para cada uma das quatro misturas com substituições de calcita pelo EPP, que são identificadas como MF3, MF5, MF8 e MF10. Para as três dosagens de fibra avaliadas neste estudo (1,0, 1,5 e 2,0%), os gráficos indicam que a carga máxima na primeira fissura ocorreu em valores de CMOD entre 0,06 e 0,11 mm. As cargas médias de primeira fissura foram 6.371 N (R, 0% EPP), 4.434 N (MF3, 30% EPP), 3.074 N (MF5, 55% EPP) 2.232 N (MF8, 80% EPP) e 1.858 N (MF10, 100% EPP), com variações de ±450 N, ±180 N, ±500 N, ±155 N e ±165 N, respectivamente. Esses resultados demonstram reduções progressivas de carga de 30%, 52%, 64% e 71% para MF3, MF5, MF8 e MF10 em comparação com a mistura de referência (R), diretamente atribuíveis à contribuição quase nula da resistência à compressão do EPP.

Para a dosagem de fibra de 1,0%, as cargas correspondentes ao final da fase de endurecimento por deformação mostram um desempenho superior para as misturas MF3, MF5 e MF8, que apresentaram resultados superiores aos apresentados pela mistura de referência, com incrementos de 29,0, 23,0 e 1,7%, respectivamente. Por outro lado, a mistura M10 apresentou uma diminuição de 17,8%. Nesta fase do ensaio e para esta dosagem de fibra, pode-se observar nestes gráficos que as deformações apresentam valores de CMOD que se situam entre 0,21 e 1,72 mm.

Para a dosagem de fibra de 1,5% e em relação à mistura de referência, as cargas correspondentes ao final da fase de endurecimento por deformação mostram um desempenho superior de 13,14% apenas para a mistura MF3, uma vez que as misturas MF5, MF8 e MF10 apresentaram reduções de 3,4, 34,9 e 14,6%, respectivamente. Nesta fase do ensaio e para esta dosagem de fibra, estes gráficos mostram que as deformações apresentam valores CMOD entre 0,62 e 1,58 mm.

Tabela 2 . Comparativa de diferentes pontos gráficos em diferentes substituições de EPP.

% EPP	Mistura ID			B		C	
		P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm	P, N	CMOD, mm
0 (Referência)	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	235	

Para a dosagem de fibra de 2,0% e em relação à mistura de referência, as cargas correspondentes ao final da fase de endurecimento por deformação apresentam um desempenho inferior para as misturas MF3, MF5, MF8 e M10, uma vez que apresentaram reduções de 0,13, 3,40, 3,76 e 33,00%. Nesta fase do ensaio e para esta dosagem de fibra, estes gráficos mostram que as deformações apresentam valores de CMOD entre 0,55 e 1,85 mm.

Para a dosagem de fibra de 1,0% e para um CMOD de 4 mm, as cargas correspondentes ao final da fase de escoamento por deformação foram 15,08% menores para a mistura MF3 e 46,15, 42,49 e 7,37% maiores para as misturas MF5, MF8 e MF10, respectivamente.

Para a dosagem de fibra de 1,5% e para um CMOD de 4 mm, em todos os casos as cargas correspondentes ao final da fase de escoamento por deformação foram superiores em 49,05, 37,96, 17,83 e 46,99%, para as misturas MF3, MF5, MF8 e MF10, respectivamente. Quanto à dosagem de 2,0% de fibra e para um CMOD de 4 mm, no final desta fase, em relação à mistura de referência correspondente, os incrementos foram de 91,15, 119,33, 126,79 e 82,84%, para as misturas MF3, MF5, MF8 e MF10, respectivamente. Esses incrementos representam um aumento significativo na capacidade de absorção de energia quando o material está sob tensões de flexão, um benefício atribuído principalmente às fibras.

7. RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E VOLUMÉTRICA (SER E BER)

A resistividade elétrica do concreto é um parâmetro que reflete o nível de densificação da matriz cimentícia no concreto, pois quanto mais densa a matriz, maior a resistividade elétrica do material e, consequentemente, maior será a resistência do material à entrada de agentes deletérios, como cloretos, sulfatos, CO_2, umidade e outros.

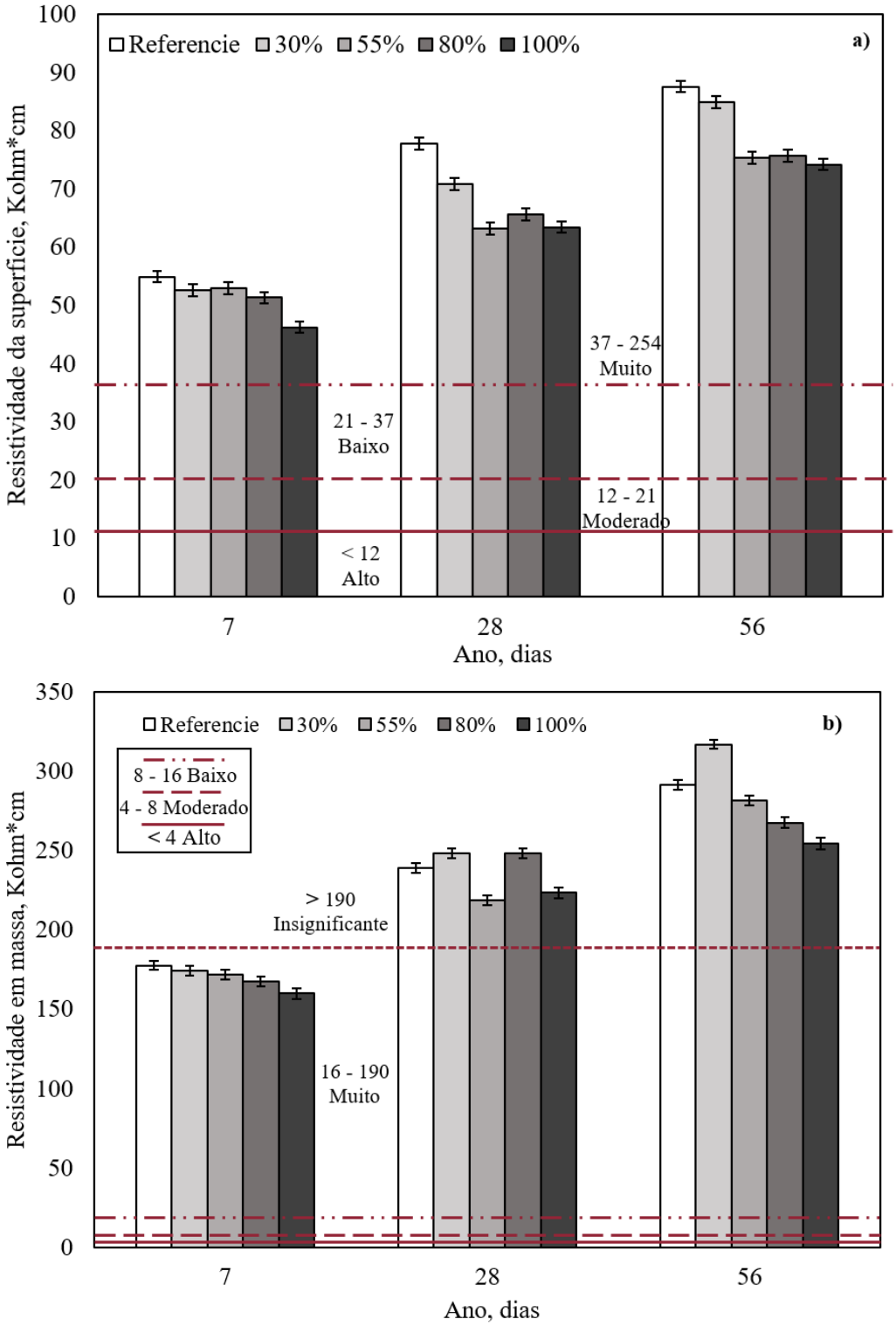


Figura 3. Resistências elétricas superficial (a) e volumétrica (b) para os cinco concretos sem fibras avaliados neste trabalho.
Insignificante

A Figura 4 apresenta as medições de resistividade elétrica superficial (SER) e volumétrica (BER) obtidas a partir de amostras cilíndricas (Ø100×200 mm). Os resultados da SER (Fig. 4a) demonstram variação mínima entre os níveis de substituição de EPP, com valores médios de 51,6 kΩ·cm (intervalo: -5,4/+3,3), 68,2 kΩ·cm (intervalo: -4,9/+9,6) e 79,5 kΩ·cm (intervalo: -5,4/+8,0)

aos 7, 28 e 56 dias, respectivamente. Esses resultados confirmam que a substituição da calcita por EPP (0-100% vol.) teve efeitos estatisticamente insignificantes ($p > 0,05$) sobre a SER, com todas as misturas apresentando consistentemente uma suscetibilidade muito baixa à penetração de íons cloreto ($37 < SER \leq 254$ kΩ·cm) de acordo com a classificação ASTM C1876 (AASHTO TP 95, 2014).

As medições de BER (Fig. 4b) mostraram estabilidade comparável, registrando valores médios de 170,3 kΩ·cm (intervalo: -10,3/+7,4), 235,5 kΩ·cm (intervalo: -16,9/+12,8) e 282,4 kΩ·cm (intervalo: -28,1/+34,6) em idades de teste equivalentes. Os desvios padrão estreitos (± < 15% dos valores médios) e a classificação como risco de penetração insignificante (BER>190 kΩ·cm) (Zulkarnain e Ramli, 2008) comprovam ainda mais que a incorporação de EPP mantém a microestrutura densa característica dos sistemas UHPC.

8. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Além da redução do peso unitário do concreto, o uso de agregados leves no concreto também leva a uma redução na condutividade térmica do material. Por esse motivo, essa propriedade foi determinada neste trabalho em concretos com e sem fibras para determinar tanto o efeito do EPP dosado em diferentes quantidades quanto o efeito da fibra sintética.

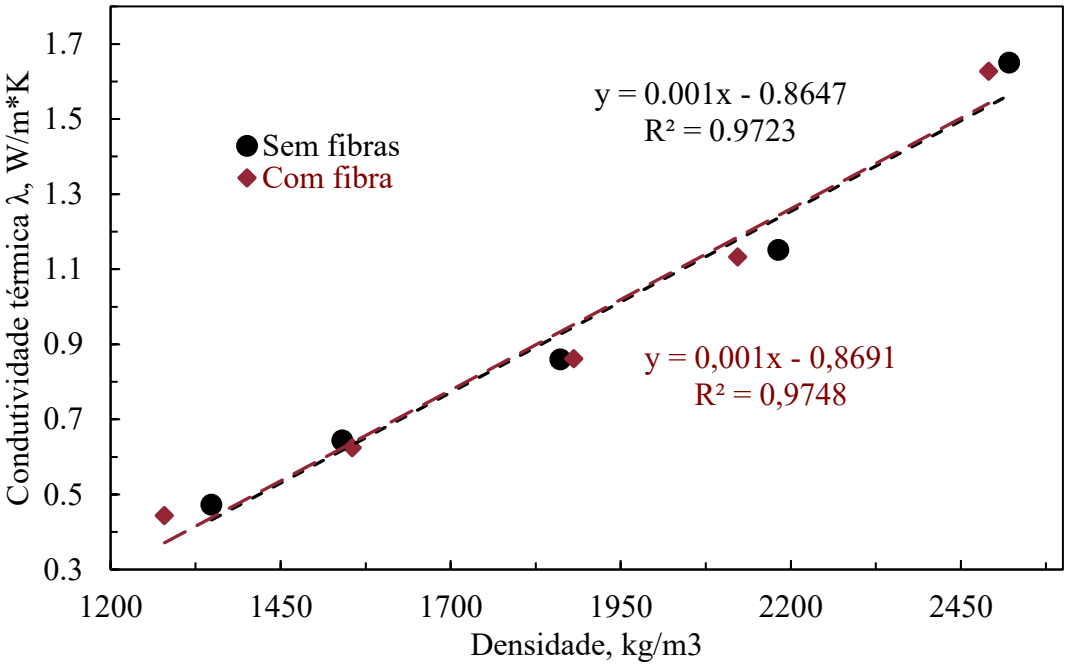


Figura 4 . Influência de diferentes porcentagens de EPP na condutividade térmica.

Como pode ser observado na Figura 5, a condutividade térmica apresenta uma correlação muito boa com a densidade do concreto e diminui à medida que o peso volumétrico do concreto diminui, a uma taxa de 1×10^{-3} para cada kg/m^3 de concreto. Também podemos observar que os resultados para os concretos com fibra foram praticamente os mesmos que os dos concretos sem fibra, uma vez que apresentaram a mesma taxa de diminuição da condutividade térmica em relação à diminuição do peso volumétrico, o que indica que, para as quantidades de fibra dosadas, a influência da fibra foi insignificante.

9. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho de pesquisa, podem-se tirar as seguintes conclusões:

1. O rápido ganho de resistência à compressão observado nos primeiros três dias (79-89% da resistência de 28 dias) é atribuído ao efeito sinérgico da baixa relação água-cimento (w/cm = 0,22) e da alta reatividade do sistema cimento-metacaulim. Notavelmente, a mistura 100% EPP atingiu 22 MPa em 56 dias, atendendo ao requisito estrutural mínimo (17 MPa por ACI 310-19) em 7 dias, validando sua adequação para aplicações pré-fabricadas com controle de qualidade.
2. A substituição do EPP reduziu as cargas de primeira fissura em 30–71% (em comparação com a mistura de referência), mas as fibras de PVA (1,5–2,0% vol.) restauraram eficazmente a capacidade pós-fissuração, particularmente durante o escoamento por deformação. A dosagem de 1,5% de PVA melhorou a resistência residual em até 29%, demonstrando seu papel crítico na manutenção da integridade estrutural sob tensões de flexão.
3. Os resultados de SER (51,6–79,5 kΩ·cm) e BER (170,3–282,4 kΩ·cm) confirmaram que a incorporação de EPP (0–100%) teve impacto insignificante na resistência ao cloreto, com todas as misturas classificadas como risco de penetração "muito baixo" (SER) ou "insignificante" (BER) de acordo com as normas ASTM/AASHTO. Isso confirma a consistência da durabilidade do EPP-UHPC, uma métrica fundamental de garantia de qualidade.
4. A condutividade térmica apresentou uma correlação inversa linear com a densidade ($\lambda = -1\times10^{-3}$ W/m·K por kg/m³, $R^2 > 0,95$), permitindo um controle previsível do desempenho para aplicações leves de isolamento. A mistura de 30% de EPP otimizou esse equilíbrio (1,1 W/m·K a 1950 kg/m³).
5. Este trabalho fornece uma estrutura em conformidade com o controle de qualidade para a produção de L-UHPC, garantindo a conformidade com os critérios mecânicos (ACI 310), de durabilidade (ASTM C1876) e de desempenho térmico para elementos híbridos arquitetônicos-estruturais.

10. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a Filiberto Marin-Lopez, da EUCOMEX, pela doação dos aditivos SP e STA, a Humberto Cantu, da KURARAY México, pela doação das fibras PVA, e ao Conselho Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), pela bolsa concedida a Jorge Xilotl para que ele pudesse realizar seus estudos de mestrado com ênfase em materiais de construção na UANL.

11. REFERÊNCIAS

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