

Mejora de la durabilidad de compuestos de hormigón sostenibles que comprenden residuos de película metalizada, fibras de envases de alimentos y cenizas de caldera de aceite de palma*

Durability Enhancement of Sustainable Concrete Composites Comprising Waste Metalized Film, Food Packaging, Fibers and Palm Oil Fuel Ash

CITACIÓN: Alyousef, R., Mohammadhosseini, H., Ebid, A. A. K., Alabduljabbar, H., Ngian, S. P., Mohamed, A. M. (2023). Mejora de la durabilidad de compuestos de hormigón sostenibles que comprenden residuos de película metalizada, fibras de envases de alimentos y cenizas de caldera de aceite de palma. *Palmas*, 44(2), 104-125.

EDITORES ACADÉMICOS: Quoc Tri Phung & Nguyen Van Tuan.

NOTA DEL EDITOR: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

PALABRAS CLAVE: Compuestos de hormigón sostenibles, Residuos de fibras de polipropileno metalizadas, Propiedades de resistencia, Penetración rápida de cloruro, Resistividad eléctrica.

KEYWORDS: Sustainable concrete composites, Waste metalized polypropylene fibers, Strength properties, Rapid chloride penetration, Electrical resistivity.

*Traducido del original Durability Enhancement of Sustainable Concrete Composites Comprising Waste Metalized Film Food Packaging Fibers and Palm Oil Fuel Ash Recuperado de *Sustainability* 2022, 14, 5253. <https://doi.org/10.3390/su14095253>

Derechos de autor: © 2022 de los autores. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/>)

ALYOUSEF, RAYED*

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería, Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz, Arabia Saudí

* Autor para correspondencia: r.alyousef@psau.edu.sa

MOHAMMADHOSSEINI, HOSSEIN

Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil, Universiti Teknologi Malaysia (UTM). Skudai 81310, Malasia

EBID, AHMED ABDEL KHALEK

Ingeniería Estructural y Gestión de la Construcción, facultad de Ingeniería, Future University en Egipto, Nuevo Cairo 11835, Egipto

ALABDULJABBAR, HISHAM

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería, Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz 11942, Arabia Saudí

NGIAN, SHEK POI

Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Civil, Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Skudai 81310, Malasia

MOHAMED, ABDELIAZIM MUSTAFA

Departamento de Ingeniería Civil, facultad de Ingeniería, Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz 11942, Arabia Saudí

Resumen

El uso de residuos en la fabricación de hormigón sostenible y ecológico es particularmente atractivo debido al bajo costo de los mismos, el ahorro de espacio en los rellenos sanitarios y al desarrollo y mejora de las calidades del hormigón. Este artículo investiga la resistencia y

la durabilidad de los compuestos de hormigón ecológico hechos de fibras de envases de alimentos de lámina metalizada (MFP por sus siglas en inglés) y ceniza de caldera de aceite de palma (POFA por sus siglas en inglés). Las propiedades exploradas incluyen las resistencias a la compresión y la tensión, la carbonatación, la contracción por secado, la resistividad eléctrica y las pruebas rápidas de penetración de cloruro en mezclas de hormigón. Con cemento Portland ordinario (OPC por sus siglas en inglés), se emplearon fibras MFP de 20 mm de longitud y fracciones de 6 volúmenes que variaban de 0 a 1,25 %. Se hicieron otras 6 mezclas de hormigón con 20 % de POFA en lugar de OPC, por sus siglas en inglés. Los resultados mostraron que la adición de fibras MFP a las mezclas de hormigón reducía su resistencia a la compresión. Y a pesar de tener una reducción menor en la resistencia a la compresión, la inclusión de fibras MFP aumentó significativamente la resistencia a la tracción. Los hallazgos mostraron que la combinación de fibras de MFP con POFA afectó sustancialmente la durabilidad del hormigón. La adición de fibras MFP a las mezclas de hormigón dio como resultado una reducción de la carbonatación y la contracción por secado. También se redujo la penetración de cloruros en las muestras mientras que la resistividad eléctrica de las muestras reforzadas aumentó casi un 80 % en comparación con el hormigón ordinario.

Abstract

The utilization of waste materials in sustainable and green concrete manufacturing is particularly appealing because of the low cost of waste resources, the saving of landfill space, and the development and enhancement of concrete qualities. This paper investigates the strength and durability of green concrete composites made of waste metalized film food packaging (MFP) fibers and palm oil fuel ash (POFA). Compressive and tensile strengths, carbonation, drying shrinkage, electrical resistivity, and rapid chloride penetration tests in concrete mixtures are among the properties explored. With ordinary Portland cement (OPC), MFP fibers of 20 mm in length and six-volume fractions ranging from 0 to 1.25% were employed. Another six concrete mixes were made with 20% POFA in place of OPC. The results showed that adding MFP fibers to concrete mixes reduced their compressive strength. Despite a minor reduction in compressive strength, the inclusion of MFP fibers significantly increased tensile strength. The findings show that the combination of MFP fibers with POFA substantially impacts concrete durability. The addition of MFP fibers to concrete mixes resulted in a reduction in carbonation and drying shrinkage. The chloride penetration of specimens was also reduced, whereas the electrical resistivity of reinforced samples rose by nearly 80% compared to ordinary concrete.

1. Introducción

El objetivo principal del desarrollo de una producción más limpia es disminuir los residuos industriales y el uso de los recursos naturales. La producción más limpia se refiere a los procedimientos que optimizan la calidad de la producción mediante la mejora de la ecoeficiencia y el uso de menos materias primas. El número y las variedades de residuos sólidos han crecido con el aumento de la población, la industrialización y la urbanización. Varios tipos de residuos no biodegradables durarán cientos, si no, miles de años en el medio ambiente, estos repercuten negati-

vamente en la eliminación de la basura y constituyen un grave peligro para este. Se está haciendo hincapié en el manejo eficiente y eficaz de los residuos para mantener la viabilidad a largo plazo de la construcción ecológica. Como resultado, su uso es uno de los aspectos más importantes en los planes de manejo de residuos en muchas regiones del mundo [1-3].

La minimización de los residuos presenta una excelente oportunidad para una fabricación más limpia, ya que optimiza la eficiencia energética, reduce el uso de energía y mejora el funcionamiento técnico de una industria. El concepto de sostenibilidad aboga por utilizar los residuos para sustituir las materias

primas como los agregados finos y gruesos, cemento y materiales fibrosos en el sector de la construcción. Esto conduciría a edificios sostenibles y respetuosos con el medio ambiente al reducir el costo de los materiales debido a la sustitución y los gastos de manejo adecuado de los residuos [4]. Los bajos costos energéticos están relacionados con los materiales ecológicos, y su uso debe ser duradero y de bajo mantenimiento, lo que resulta en materiales de construcción perdurables [5, 6].

En 2015, el uso mundial de plástico alcanzó los 297,5 millones de toneladas y Asia representó el 30 % del consumo mundial en los últimos años. La basura plástica constituyó alrededor de 16 % del peso total de los residuos sólidos municipales. La poliolefina, un plástico popular, es menos biodegradable, y cuando se elimina como basura sólida tiene un impacto perjudicial a largo plazo sobre el medio ambiente. La biodegradación de diversos tipos de plásticos, como el polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés), el polietileno de baja densidad (LDPE por sus siglas en inglés), el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) en suelos naturales, reveló que algunos microorganismos del suelo, como hongos y bacterias, tienen una capacidad metabólica específica para asimilar estos plásticos como fuentes de carbono y energía para su crecimiento [7]. Aproximadamente la mitad de estos materiales eran productos de consumo de un solo uso, lo que tuvo un impacto considerable en el aumento de los residuos plásticos. De acuerdo con Sharma y Bansal [8], los plásticos contribuyen con un volumen cada vez mayor al flujo de residuos sólidos debido a su amplia variedad de aplicaciones. Como resultado, los datos cuantitativos sobre la producción de residuos plásticos rara vez se hacen públicos porque generalmente se mantienen internamente o se administran comercialmente. Según Plastics Europe, Europa crea 25 millones de toneladas de basura plástica cada año [9]. Más de una cuarta parte de los residuos generados en los Estados Unidos en 2014 se reutilizó de manera eficiente, mientras que el resto se destinó al reciclaje energético y rellenos sanitarios [10].

Las tasas mundiales de reciclaje y recuperación energética han aumentado gradualmente en la última década, lo que ha provocado una disminución de la eliminación de residuos en los rellenos sanitarios. La tasa de vertido varía sustancialmente en toda Europa.

Las prohibiciones de vertido se han traducido en menos de un 10 % de eliminación de residuos plásticos. Según Erkisen *et al.* [11], en otros países casi la mitad de todos los residuos plásticos terminan en los rellenos sanitarios. Según Faraca y Astrup [12], la mayoría de los plásticos son no biodegradables y químicamente inertes en la naturaleza. Este tipo de productos basados en polímeros tienen el potencial de durar décadas o quizás siglos en el medio ambiente. Como resultado de las reacciones químicas en ciertos plásticos, como el PC, PP y PVC, pueden liberarse compuestos peligrosos al aire, al agua y al suelo [13]. En consecuencia, a los ojos del público, los plásticos desechados en cualquiera de sus formas son un gran problema medioambiental.

No obstante, la mayoría de los residuos plásticos, aunque no todos los tipos de residuos de polímeros, pueden reutilizarse y tratarse térmica o químicamente [14]. Los de láminas de polipropileno metalizado (MFP) se producen y desechan en rellenos sanitarios de todo el mundo. Estos se utilizan principalmente en el envasado de alimentos y están hechos de materiales poliméricos con un recubrimiento de aluminio delgado en la parte exterior. El MFP es el menos procesable y reciclable de todos los residuos plásticos [9]. Dado que no hay una forma adecuada de reciclar una cantidad tan grande de residuos, estos se desechan y se queman en rellenos sanitarios [15,16]. Por consiguiente, se han vuelto necesarios métodos de eliminación confiables para reemplazar los procesos existentes.

El hormigón es un material de construcción bien conocido en todo el mundo debido a la accesibilidad de los materiales, la simplicidad de fabricación y la buena durabilidad y propiedades mecánicas [17]. Sin embargo, debido a su uso generalizado, particularmente en el sector industrial, se ve sometido constantemente a ataques químicos. Estos pueden ocurrir de forma natural, como los sulfatos en los suelos y las aguas subterráneas, o a través de ataques químicos antropogénicos, como las aguas residuales de drenajes y las aguas residuales industriales, que degradan el desempeño de las estructuras y limitan su vida útil. Liu *et al.* [18] sugirieron que la degradación del hormigón podría deberse a procesos químicos causados por el intercambio iónico en tales entornos hostiles. Como resultado de estas acciones, los productos de hidratación se degradan, formando compuestos peli-

grosos en el hormigón, como la etringita y partículas de yeso. En consecuencia, la microestructura presenta grietas, astillado y desigualdades, lo que reduce la resistencia y la durabilidad de las construcciones de hormigón [19,20]. Según Abro *et al.* [21] y Buller *et al.* [22], el agrietamiento es uno de los problemas más comunes con el hormigón simple sujeto a químicos, por lo que se requieren enfoques prácticos para reducir la fragilidad de sus componentes bajo ataques químicos. Estos autores señalaron que el uso de fibras cortas puede reforzarlo y mejorar su rendimiento en condiciones duras al mejorar la fragilidad del hormigón. Además, Alrshoudi *et al.* [23] y Alnahhal *et al.* [24] encontraron que el uso de materiales puzolánicos como los de cementación parcial, como la ceniza residual en las calderas de las plantas de beneficio de palma de aceite (POFA), mejoró el rendimiento del hormigón sometido a ataques químicos al reducir la tasa de pérdida de masa y pérdida de resistencia.

No cabe duda de que se está prestando especial atención a la gestión más limpia y eficiente de varios tipos de generación de residuos para garantizar la sostenibilidad en la construcción ecológica. Los residuos son una de las principales preocupaciones en cuanto a las técnicas para su gestión. El reciclaje beneficia al medio ambiente al reducir la contaminación, minimizar el vertido y la eliminación de desechos, y proteger los recursos naturales. Se ha desarrollado una nueva forma de hormigón utilizando residuos plásticos como componentes fibrosos y POFA como sustituto parcial del cemento. Debido a que la POFA es un material puzolánico, se empleó para crear compuestos de hormigón y se aprovechó la disponibilidad local de residuos plásticos. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este estudio es analizar el impacto combinado de las fibras de residuos plásticos y la POFA en el comportamiento del hormigón y ver cómo las primeras contribuyen a una mejor absorción de energía en comparación con el hormigón simple sin fibras. El uso de fibras plásticas residuales y POFA en la fabricación de hormigón ecológico y sostenible podría tener beneficios ambientales y económicos.

Además, es útil ya que reduce los problemas de vertido y el consumo de materias primas, al tiempo que aumenta la creación de elementos de construcción ecológicos y sostenibles. La literatura actual ha sugerido que los materiales puzolánicos y las fibras

cortas mejoran el rendimiento del hormigón frente a ataques químicos. El objetivo de este estudio fue investigar los efectos combinados de los residuos plásticos y la POFA en la resistencia y la durabilidad del hormigón. Aunque este análisis incluye una investigación sobre las fibras de base polimérica, como el polipropileno (PP), los experimentos y análisis realizados se basan en un tipo de fibra: los envases de alimentos de película metalizada (MFP). Este trabajo se ha centrado en el desempeño del hormigón que contiene fibras de MFP y POFA expuestas a productos químicos, pero se cree que es necesario comprender y solucionar ciertos problemas técnicos antes de utilizar cualquier fibra fabricada con residuos en el hormigón. En este estudio se realizó una comparación entre la resistividad eléctrica, la penetración rápida de cloruro, la contracción por secado y la resistencia de las mezclas de hormigón que contienen fibras MFP y hormigón liso. Además, se empleó difracción de rayos X (XRD) y microscopía electrónica de barrido (MEB) para investigar la microestructura de los compuestos de hormigón.

2. Programa experimental

2.1 Materiales

En esta investigación se empleó un hormigón tipo I que cumplía con los requisitos de ASTM C 150-07. Además, se reemplazó la POFA por OPC a un nivel de sustitución de 20 %. Se utilizaron los residuos de las plantas de beneficio del sector para obtener las partículas de ceniza de caldera de planta de beneficio en bruto. Estas se secaron a 100 °C antes de tamizarlas para eliminar las partículas más grandes que 150 µm. Posteriormente, las diminutas partículas de ceniza se almacenaron en una máquina de trituration y la operación de molienda se repitió durante aproximadamente 2 horas por cada 4 kg de ceniza. Las partículas de POFA molidas se probaron de acuerdo con los requisitos de BS 3892: 1-1992 y ASTM C618-15 para conseguir las características requeridas, como se muestra en la Figura 1. Como materiales de cementación se emplearon las cenizas que cumplían con los estándares requeridos y tenían las composiciones químicas y cualidades físicas apropiadas, como se muestra en la Tabla 1. Se utilizó arena de río natural, con un peso específico de 2,6 g/cm³, un módulo granulométrico de 2,3, absorción de

agua del 0,7 % y un tamaño máximo de 4,75 mm. Se emplearon agregados gruesos de granito triturado con una absorción de agua de 0,5 %, un peso específico de 2,7 g/cm³ y un tamaño máximo de 10 mm. Las fibras fabricadas con residuos de envases de alimentos de película metalizada con un procedimiento de metalización de aluminio utilizado en

envases de alimentos, se recogieron como basura y se limpiaron para eliminar cualquier contaminante. Las láminas de residuos se dividieron entonces en fibras de 2 mm de ancho y 25 mm de largo, como se muestra en la Figura 2. La Tabla 2 muestra los parámetros de ingeniería típicos de la fibra MFP empleada en este trabajo.

Figura 1. Imagen MEB de partículas POFA

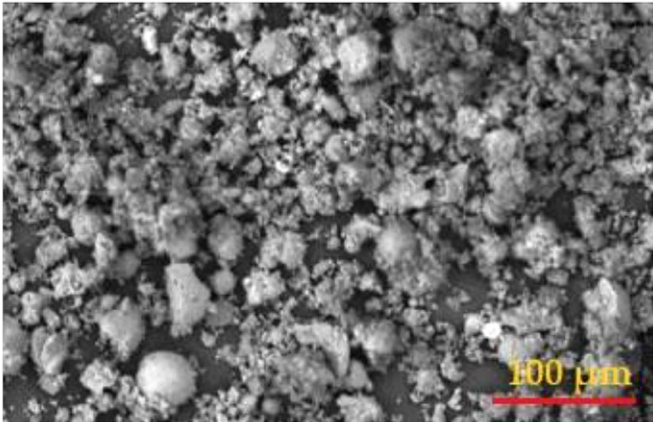


Tabla 1. Propiedades del OPC y POFA.

Material	Propiedades físicas		Composición química (%)							
	Gravedad específica	Finura de Blaine	SiO ₂	AL ₂ O ₃	FE ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	LOI: loss on ignition
OPC	3,15	3.990	20,3	5,3	4,21	62,5	1,53	0,005	2,13	2,35
POFA	2,42	4.930	62,7	4,8	8,14	5,8	3,54	9,07	1,17	6,28

Figura 2. Fibras fabricadas a partir de residuos de envases de alimentos de lámina metalizada

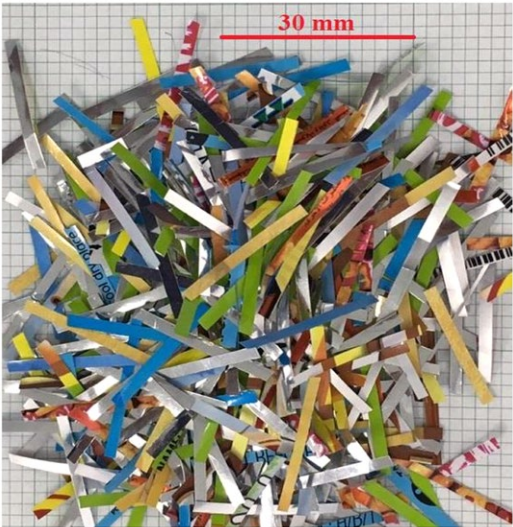


Tabla 2. Propiedades típicas de las fibras MFP.

Tipo de resina	Tamaño (ancho x largo) (mm)	Rango de densidad (kg/m ³)	Grosor (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación
Polipropileno	2 x 25	0,94	0,08	560	8-10

2.2 Proporciones de mezcla y métodos de prueba

La Tabla 3 muestra las proporciones de mezcla de los diversos componentes utilizados en la producción de compuestos de hormigón. En total, se hicieron 12 mezclas de hormigón, de las cuales el primer lote fue la mezcla de control sin ningún POFA ni fibras. Entre las 12 mezclas, 6 lotes contenían OPC con fracciones de volumen de fibra de 0 %, 0,25 %, 0,5 %, 0,75 %, 1,0 % y 1,25 % (B1-B6). Se hicieron otros 6 lotes con POFA, reemplazando el OPC en un 20 % para las mismas fracciones de volumen de fibra (B7-B12), con una relación constante de agua/aglutinante (a/g) de 0,48. El procedimiento de combinación de componentes para hormigón reforzado con fibra difirió ligeramente del de cemento convencional. En la primera fase se añadieron POFA y OPC a una mezcla seca de agregados finos y gruesos. Se adiciona-

ron el superplastificante y el agua y se agitó durante aproximadamente 2 minutos. Finalmente, se añadió la cantidad deseada de fibras y el proceso de mezcla se mantuvo durante otros 2 minutos para asegurar que estas se distribuyeran uniformemente por toda la mezcla.

Para evaluar la resistencia a la compresión, se construyeron especímenes cúbicos con lados de 100 mm de acuerdo con las normas BS EN 12390:2-09 y BS EN 12390-3:09. Se prepararon especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm de acuerdo con las normas ASTM C496-11 y ASTM C512, respectivamente, para dividir las mediciones de resistencia a la tracción y contracción por secado. Después de curar los especímenes de hormigón en el tanque de agua durante 28 días, se llevó a cabo una prueba de contracción por secado desde el día 1 hasta el día 180. Al completarse el periodo de curado, los especímenes se colocaron en una cámara de secado con temperatura y humedad

Tabla 3. Descripción de las proporciones de mezcla para varias mezclas de hormigón.

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	POFA (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)	V _f (%)
B1	440	-	212	835	855	0,0
B2	440	-	212	835	855	0,25
B3	440	-	212	835	855	0,50
B4	440	-	212	835	855	0,75
B5	440	-	212	835	855	1,0
B6	440	-	212	835	855	1,25
B7	352	88	212	835	855	0,0
B8	352	88	212	835	855	0,25
B9	352	88	212	835	855	0,50
B10	352	88	212	835	855	0,75
B11	352	88	212	835	855	1,0
B12	352	88	212	835	855	1,25

controladas durante el periodo de prueba. Además, se expusieron especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm a una atmósfera propensa al dióxido de carbono (CO_2) para evaluar el ataque de la carbonatación sobre el hormigón. La profundidad de carbonatación de los especímenes de hormigón bajo difusión de CO_2 podría usarse para determinar la resistencia de estos a la carbonatación. A lo largo de la prueba se siguió el procedimiento propuesto por el Comité CPC-18 del RILEM. La profundidad de la carbonatación apareció mediante la aspersión de la solución de fenolftaleína en los lados divididos de los especímenes de hormigón, como se muestra en la Figura 3. Se puede ver que el color del área no carbonatada cambió a púrpura, mientras que el del área carbonatada permaneció incoloro. Los investigadores midieron la profundidad de carbonatación a los 90 y 180 días. Por lo tanto, se utilizó el espacio entre el borde de los especímenes y el límite de color púrpura para determinar la profundidad promedio de carbonatación.

Se realizó una prueba de penetración rápida de cloruro de acuerdo con la norma ASTM C1202-12. Se hizo en especímenes cilíndricos de 100 mm x 50 mm que se curaron y saturaron adecuadamente en la superficie después de 28 y 90 días. El espécimen saturado se colocó entre 2 celdas de plexiglás, y los bordes de los especímenes y las celdas se sellaron con un sellador de alta viscosidad. Se puso una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,3 N en la celda conectada al

terminal positivo de la fuente de alimentación. Por otro lado, la celda conectada al terminal negativo se llenó con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3 %. La energía fue suministrada por una fuente de alimentación de CD regulada por APLAB, modelo 7231, con una resistencia de derivación para la medición de corriente. Se probaron 3 especímenes diferentes para cada edad de curado. Se mantuvo una diferencia de potencial de DC de 60 voltios (60 v) a lo largo del espécimen durante 6 horas, con lecturas de corriente tomadas cada 30 min. Se calculó la carga total recorrida a través del espécimen de hormigón y se realizaron las correcciones apropiadas utilizando la Ecuación (1). Por otra parte, los especímenes de hormigón con OPC y POFA se sumergieron en una solución de cloruro de sodio al 5 % (NaCl) durante 90 días para analizar su estructura mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (MEB) y difracción de rayos X (XRD) bajo el ataque de cloruro.

Ecuación 1

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360})$$

donde Q es la carga pasada (culombios) e I es la corriente (amperios) en un momento dado ($t = 0$ a 360 min).

Figura 3. Indicación de la profundidad de la carbonatación en especímenes de hormigón mediante el uso de solución de fenolftaleína



El Resipod SFE 2011.03.31, un medidor de resistividad eléctrica de alta resolución de la marca Proceq, evaluó la resistividad eléctrica del hormigón. De acuerdo con el método de ensayo estándar AASHTO-TP-95-11, la prueba se realizó utilizando la técnica de sonda de matriz de Wenner de 4 puntos. La prueba se realizó a los 28 y 90 días en superficies suficientemente curadas y saturadas con especímenes cilíndricos de 100 mm x 200 mm. Se midieron 4 posiciones longitudinales cuaternarias del espécimen y cada ubicación se midió 1 vez. En consecuencia, se recogieron 24 mediciones de resistividad para 3 especímenes. Se calculó la resistividad eléctrica del hormigón promediando las mediciones registradas para cada espécimen.

3. Resultados y discusión

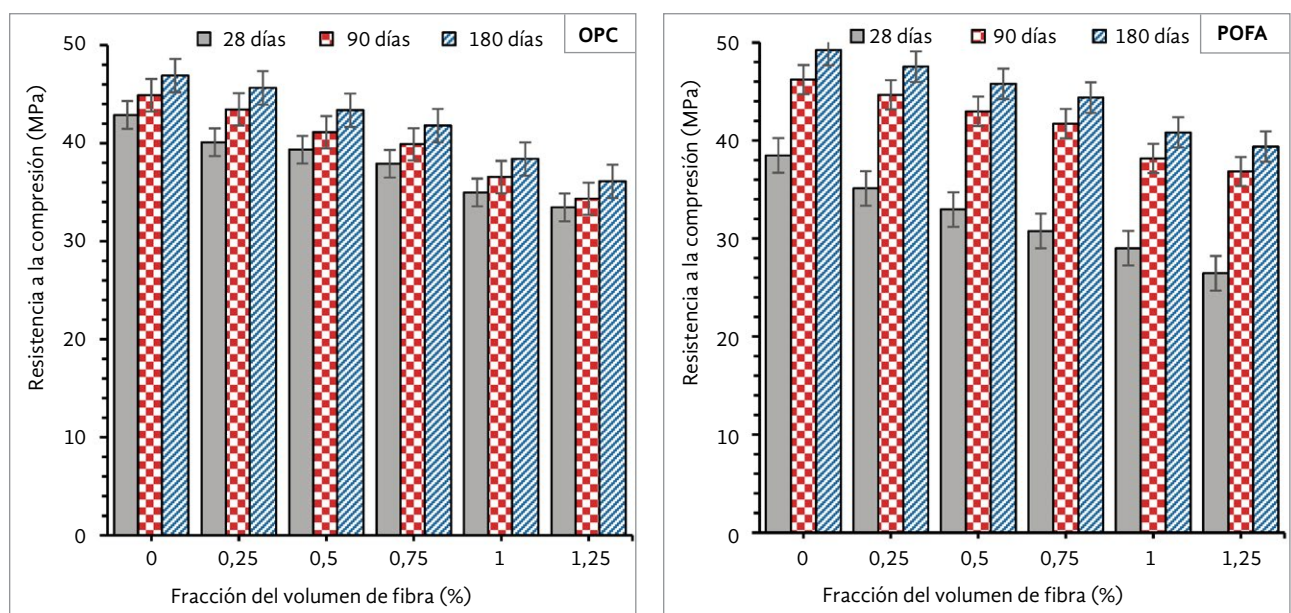
3.1 Resistencia a la compresión

La Figura 4 muestra los resultados de la prueba de resistencia a la compresión para mezclas de hormigón, incluidas las fibras MFP. Estos mostraron que la adición de fibras MFP a las mezclas de hormigón redujo su resistencia a la compresión. También se observó que a edades superiores a 90 días, los valores de resistencia adquiridos en las mezclas de POFA fue-

ron más significativos que en las mezclas de OPC. Las resistencias a la compresión de las mezclas de hormigón OPC de 28 días que comprenden 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibras de MFP fueron 40,1; 39,4; 37,9; 35 y 33,5 MPa, respectivamente, que son ligeramente inferiores a los 42,8 MPa observados para la mezcla de hormigón simple con 0 % de fibras de MFP. De manera similar, a los 28 días, la adición de las mismas fracciones de volumen de fibras MFP a las mezclas de POFA dio como resultado resistencias a la compresión de 35,1; 33; 30,8; 29,1; y 26,5 MPa, respectivamente, que son menores que los 38,5 MPa observados para la mezcla POFA-liso. Se puede observar que los valores de resistencia adquiridos de las mezclas de POFA fueron algo menores que los de las mezclas de POFA después de un tiempo de curado de 28 días. Esto podría deberse a la tasa de hidratación retardada de POFA, que causa niveles de resistencia más bajos a una edad temprana. Además, las cavidades en los especímenes de hormigón, causadas por la falta de productos de hidratación en las mezclas de POFA y el efecto de bola causado por una mayor dosis de fibra, dan como resultado valores de resistencia significativamente más bajos [25].

Sin embargo, debido a la utilización de POFA y sus fuertes características puzolánicas, las resisten-

Figura 4. Resistencia a la compresión de mezclas de hormigón con fibras MFP



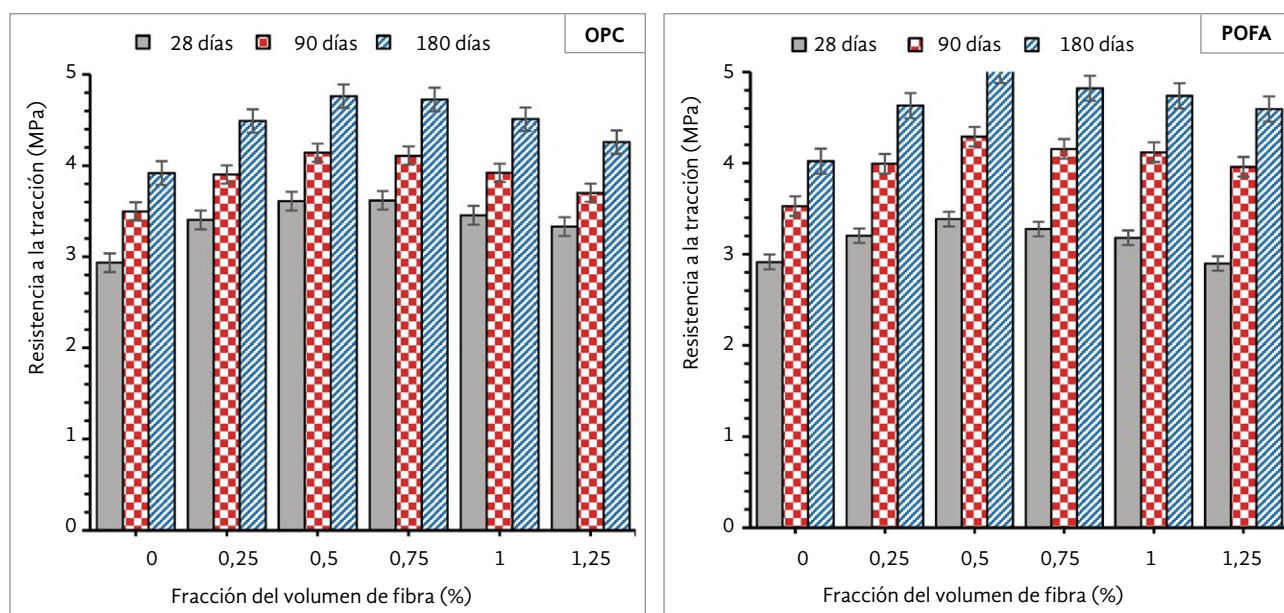
cias obtenidas de las mezclas de hormigón fueron significativamente mayores que las de las mezclas de edad temprana después de un periodo de curado prolongado de 180 días. Por ejemplo, se observaron resistencias a la compresión de 47,6; 45,8; 44,4; 40,8; y 39,4 MPa para las mezclas de POFA con el mismo contenido de fibra después de 180 días de curado, que son todas superiores a 30 Mpa y, con base en las especificaciones estándar, pueden usarse como aplicación estructural. Las mezclas de OPC con las mismas dosis de fibra tenían valores de resistencia a la compresión más bajos, iguales a 45,6; 43,7; 41,8; 38,4; y 36,1 MPa. Se descubrió que las mezclas de POFA tenían mejores valores de resistencia que los especímenes de OPC cuando el contenido de fibra era el mismo. Los hallazgos de este estudio son comparables a los publicados por Mujedu *et al.* [26], que demostraron un aumento considerable en la resistencia a la compresión del hormigón mediante el uso de POFA como sustituto parcial del cemento durante los tiempos de curado prolongados.

3.2 Resistencia a la tracción

Los resultados de la prueba de resistencia a la tracción para mezclas de hormigón que tienen las fibras

de MFP a diferentes edades se muestran en la Figura 5. Se puede observar que la adición de estas fibras mejoró notablemente la resistencia a la tracción de todas las mezclas de hormigón, y todos los especímenes de hormigón reforzado tuvieron una mejor resistencia a la tracción que la mezcla de control. A partir de los 90 días, el desarrollo de resistencia de las mezclas de POFA fue mayor que el de las combinaciones de OPC. La inclusión de fibras de MFP a dosis de 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % dio como resultado resistencias a la tracción de 3,4; 3,61; 3,65; 3,46; y 3,3 MPa, respectivamente, después de un tiempo de curado de 28 días, que es mayor que los 2,93 MPa de la mezcla de control. Para las mismas dosis de fibra, se informaron resistencias a la tracción más bajas de 3,2; 3,4; 3,28; 3,18; y 2,92 MPa para las mezclas de POFA. Además, las resistencias a la tensión de las mezclas de POFA fueron mayores que las de las mezclas de OPC, incluidas las fibras MFP, después de una edad de curado más prolongada de 180 días. La resistencia a la tracción de las mezclas de POFA a los 180 días fue de 4,63; 5,02; 4,82; 4,74; y 4,59 MPa para el mismo contenido de fibra, que es algo mayor que los valores de 4,49; 4,76; 4,7; 4,5; y 4,26 MPa para la mezcla de OPC, respectivamente.

Figura 5. Resistencia a la tracción de mezclas de hormigón reforzadas con fibras MFP



Se demostró que las fibras MFP tienen una capacidad mejorada para soportar la tensión de rotura después del fallo sin colapsarse por completo en la mayoría de los casos. Además, los modos de falla de los especímenes reforzados fueron más dúctiles que los especímenes de hormigón simple. La alta resistencia a la tracción de las mezclas de POFA reforzadas con fibras de MFP durante los tiempos de curado prolongados podría atribuirse a la fuerte unión entre las fibras de MFP y la matriz de hormigón y al efecto de puente de las fibras, lo que evita las microgrietas y que los especímenes se colapsen repentinamente. Además, debido a la creación de productos de hidratación adicionales, la actividad puzolánica de POFA dio como resultado una mayor mejora de la resistencia del hormigón, particularmente con duraciones de curado más largas [27]. El área de contacto entre las fibras y la matriz se reduce con mayores dosis de fibras debido al comportamiento de las plásticas y sus características de conexión limitadas, lo que resulta en valores más bajos de resistencia a la tracción. Por otro lado, todos los especímenes mejorados mostraron una mejor resistencia a la tracción que las mezclas ordinarias [28].

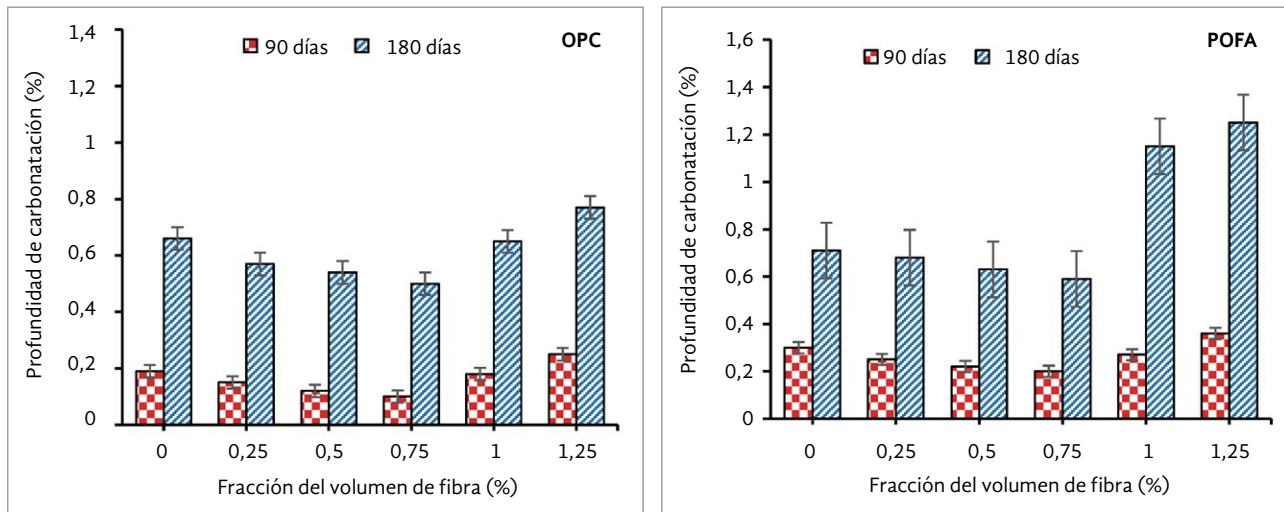
3.3 Carbonatación

La Figura 6 muestra las profundidades de carbonatación natural de mezclas de hormigón con contenidos variados de MFP después de 90 y 180 días de exposición al aire libre. La profundidad de carbonatación se redujo al introducir fibras de MFP en el compuesto de hormigón. Los compuestos de hormigón OPC tenían profundidades de carbonatación más bajas que el hormigón ordinario para dosificaciones de fibra de 0,75 %. Para mezclas de hormigón que comprenden 0,25 %; 0,5 %; y 0,75 % de fibra, se han observado profundidades de carbonatación de 0,57; 0,54; y 0,5 mm. Después de 180 días de exposición, estos hallazgos fueron menores que los 0,66 mm logrados por la mezcla de control. Para que la profundidad de carbonatación crezca por encima de 0,75 % se debe aumentar el contenido de fibra. Se encontró una profundidad de 0,77 mm en la mezcla que contenía 1,25 % de fibra. Un estudio anterior realizado por Zhang y Li [29] encontró que la carbonatación en los compuestos de hormigón se vio afectada por la presencia de fibra de PP.

La propagación de la carbonatación es el proceso por el cual el CO_2 se difunde en el hormigón desde el entorno circundante y, a medida que aumenta la profundidad de difusión del CO_2 , también aumenta la profundidad de carbonatación. Además de la presencia de poros y microgrietas en el hormigón, la carbonatación es provocada por factores externos. La dispersión homogénea de fibras en el compuesto de hormigón pretende proporcionar una red ordenada de fibras cortas para reducir la porosidad capilar. Además, las propiedades antigrietas de las fibras pueden reducir el número de estas en los compuestos de hormigón. Como resultado, la inclusión de fibras de base polimérica en los compuestos de hormigón mejora la resistencia a la carbonatación [30,31].

La cantidad comparativamente modesta de OPC en la mezcla de hormigón y la baja actividad puzolánica de las partículas de POFA a edades tempranas pueden atribuirse al aumento de la carbonatación en los especímenes que contienen POFA. Sin embargo, debido a que la prueba se realizó utilizando una muestra que se había conservado durante 28 días en un tanque de agua, la hidratación del espécimen de POFA se vio comprometida. Por consiguiente, se obstaculizó el crecimiento de la resistencia y se redujo la resistencia a la entrada de partículas químicas dañinas. Las mezclas de POFA tienen menos hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que el hormigón estándar que no contiene POFA. Dado que la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en el hormigón POFA está disminuyendo, existe un mayor riesgo de intrusión de CO_2 del medio ambiente, lo que podría conducir a una carbonatación acelerada [32]. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formado durante la hidratación del OPC interactúa con la POFA a medida que avanza el proceso puzolánico, reduciendo la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El CO_2 reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durante el proceso de carbonatación. Después de la reacción puzolánica con el hidróxido de calcio en ciertos puntos, el CO_2 penetrará más profundamente en la muestra de hormigón para reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ existente y la profundidad de la carbonatación aumentará. Sin embargo, se prevé que el curado satisfactorio del hormigón POFA reduzca la carbonatación debido a la estructura de refinamiento de poros más apretada que resulta de la respuesta puzolánica del POFA en periodos más largos [33,34].

Figura 6. Variación en la profundidad de carbonatación de mezclas de hormigón que contienen fibras MFP



3.4 Contracción por secado

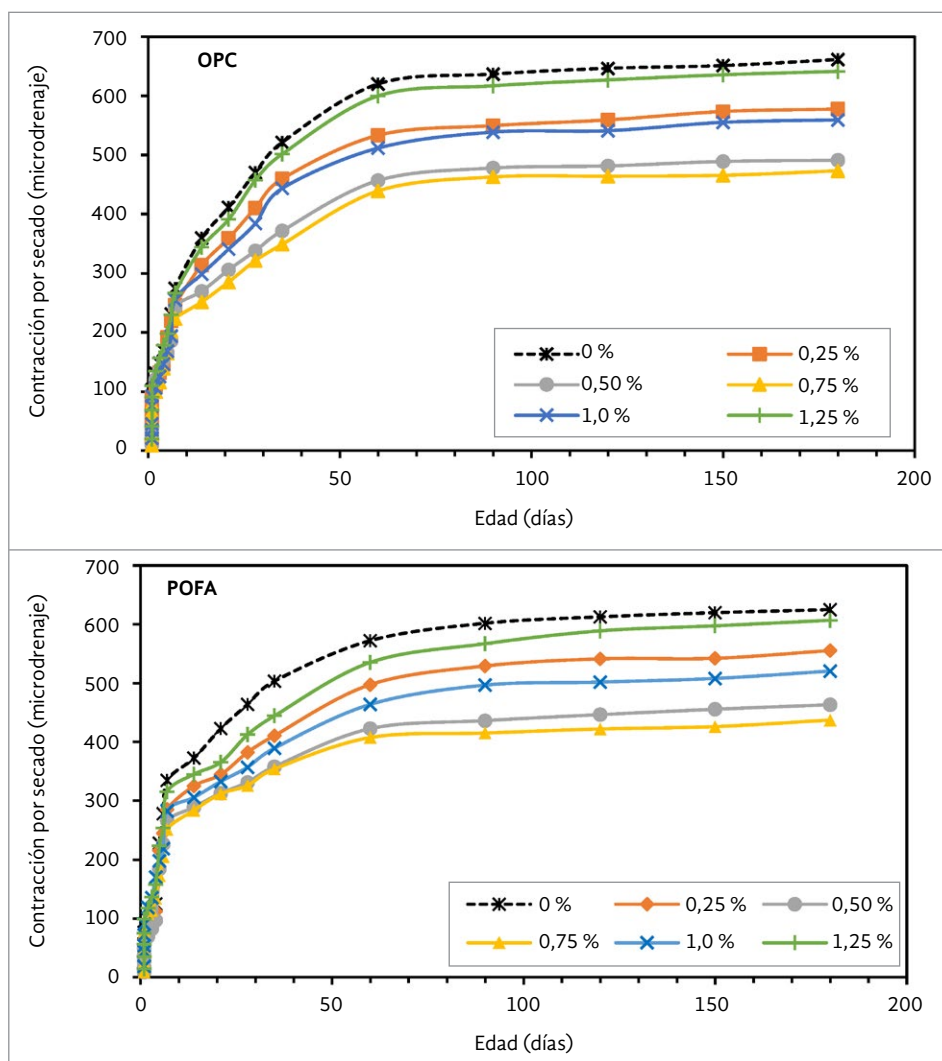
En este estudio se investigó la influencia de las fibras de MFP en el comportamiento de contracción por secado del compuesto de hormigón. Con la adición de estas fibras a todas las mezclas se redujo dicha contracción. La contracción por secado más considerable en los especímenes de hormigón OPC surgió en la mezcla plana de control, como se muestra en la Figura 7. En comparación con la combinación de control de OPC, las mezclas que incluyen 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibras de MFP causaron una disminución del 10,6 %; 25,7 %; 16 %; y 5,5 % en la contracción por secado después de 180 días. Además, la combinación con fibras al 0,75 % mostró la menor contracción por secado. El comportamiento a tracción superior del hormigón y la acción de conexión de las fibras a lo largo de las fracturas se atribuyeron a la reducción de la contracción de las mezclas, incluyendo hasta un 0,75 % de fibra. Las mezclas de hormigón POFA se reforzaron adicionalmente con fibras de MFP, como se ve en la Figura 6. En comparación con el preparado sin fibras, el que tenía 20 % de POFA que incorpora el mismo contenido de fibra de MFP mostró una contracción por secado menor de 11,5 %; 24 %; 29,9 %; 18,5 %; y 6 %, respectivamente.

Debido a que la prueba se realizó utilizando especímenes curados durante 28 días, el proceso de hidratación de los especímenes de POFA se retrasó inicialmente en el periodo de curado. Como resultado, el desarrollo de la resistencia se vio afectado y se mejoró la contracción por secado. Por otro lado, las fibras cortas redujeron la contracción marginalmente al funcionar como una conexión entre la matriz y los agregados. Debido al carácter puzolánico de la POFA y la generación de producto de hidratación adicional durante tiempos de curado prolongados, se creó un fuerte vínculo entre las fibras y la matriz de cemento, lo que resultó en valores de contracción por secado reducidos. El hormigón con cenizas volantes que incorpora fibra de PP exhibió una contracción por secado muy mínima, según Karahan y Atis [35]. También encontraron que el aumento en el contenido de fibra estaba asociado con una disminución en la contracción por secado.

3.5 Resistividad eléctrica

Se pueden usar diferentes pruebas para determinar la resistencia a la corrosión de las barras de refuerzo en el hormigón. También utilizar un método no destructivo de prueba de resistividad eléctrica para eva-

Figura 7. Variación en la contracción por secado de mezclas de hormigón que contienen fibras MFP

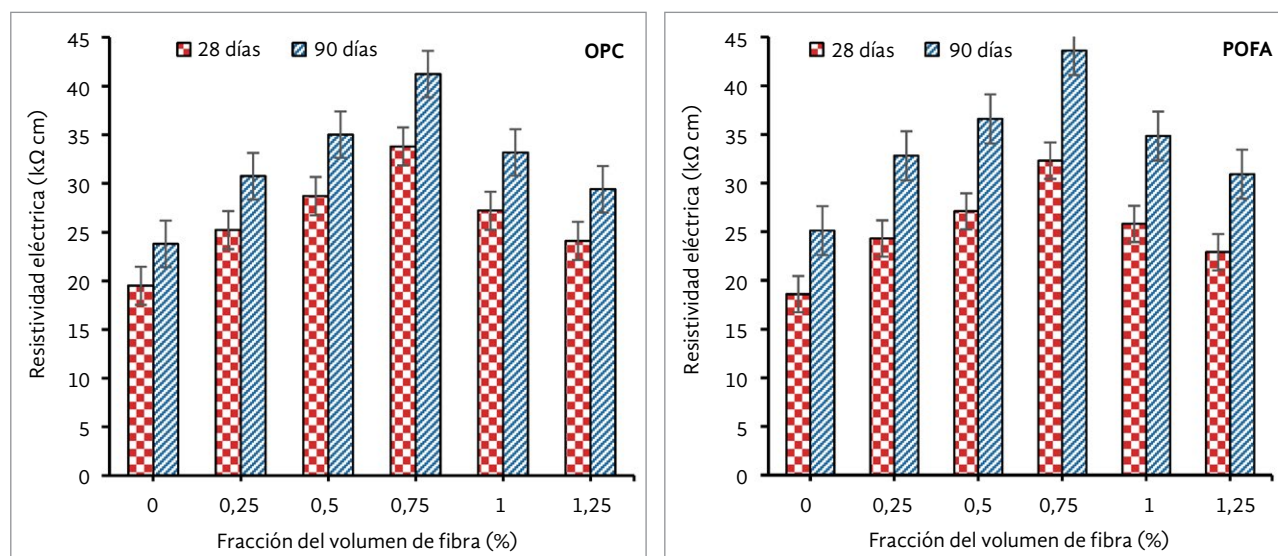


luar el riesgo de corrosión según las clasificaciones existentes [36]. Una mayor resistencia eléctrica significa una menor velocidad de corrosión. Los resultados promedio de la prueba de resistividad eléctrica de las diversas mezclas de hormigón, incluidas las fibras de MFP, se muestran en la Figura 8. Las mezclas de hormigón tenían una verdadera resistividad eléctrica que variaba de 18,5 a 43,7 kΩ cm. Según Wang y Aslani [37], la resistividad eléctrica genuina del hormigón debe ser mayor de 5 kΩ cm porque la tasa de corrosión es considerable por debajo de este nivel. Cuando la resistividad eléctrica genuina del hormigón está entre 5 y 10 kΩ cm, se considera que

tiene una tasa de corrosión moderada a baja; sin embargo, cuando la verdadera resistividad eléctrica está por encima de 10 kΩ cm, se dice que tiene una fuerte resistencia a la corrosión [38].

Todas las mezclas de hormigón en esta investigación tenían una resistencia eléctrica mayor de 10 kΩ cm. A los 90 días, sin embargo, los valores de resistividad eléctrica reales fueron mayores. Se observaron valores de 30,7; 35,1; 41,3; 33,2; y 29,4 kΩ cm para las mezclas de OPC que comprenden 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibra de MFP, respectivamente, que son todas mayores que los 23,8 kΩ cm informados para el hormigón liso de OPC. De manera similar, los valores de

Figura 8. Resistividad eléctrica de mezclas de hormigón reforzadas con fibras MFP



resistividad eléctrica para la mezcla de POFA reforzada con las mismas cantidades de fibra fueron 32,8; 36,6; 43,6; 34,8; y 30,9 kΩ cm, respectivamente, y los valores resultantes son mayores que los 25,1 kΩ cm encontrados en la mezcla lisa.

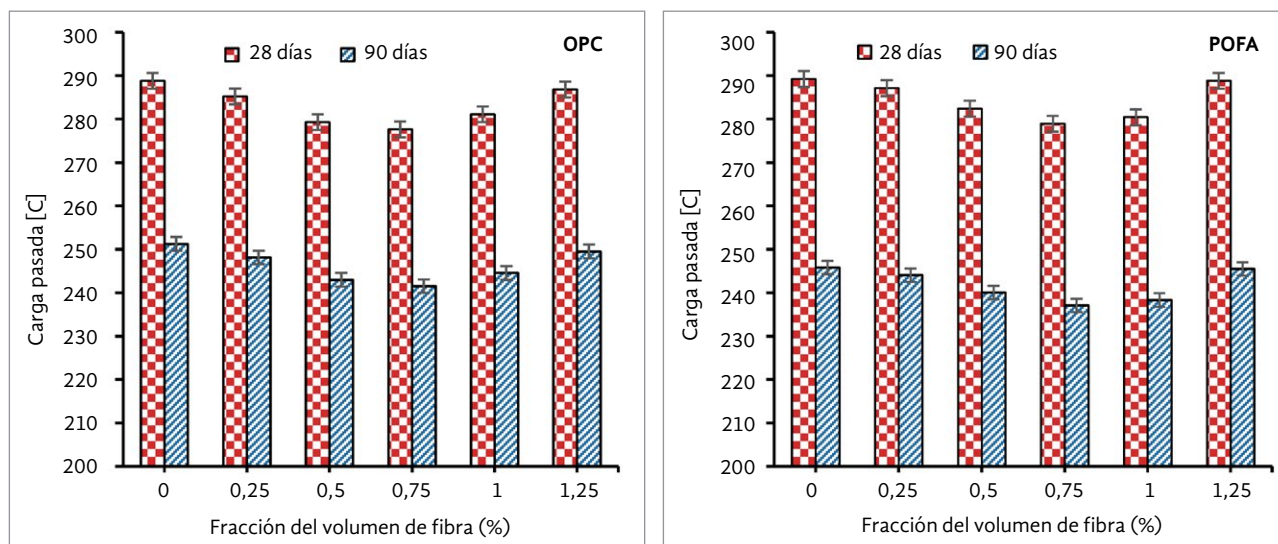
Los hallazgos muestran que la adición de POFA al hormigón afecta significativamente su resistividad eléctrica. En comparación con las mezclas de OPC, la sustitución de 20 % del peso del cemento con POFA aumentó la resistividad eléctrica del espécimen de 90 días. Esto se debe a la actividad puzolánica de POFA, que densifica la microestructura del hormigón y, como resultado, modifica las especies y concentraciones de iones en su matriz. Lim *et al.* [39] encontraron que cuando se agregaron mezclas minerales a la mezcla de hormigón, los productos de hidratación adicionales, como los geles C-S-H y C-A-H, llenaron los microhuecos en la matriz, disminuyendo la porosidad y la conectividad de los poros, con el consiguiente aumento de la resistencia eléctrica. Se descubrió que la combinación que incluía tanto fibras de POFA como de MFP al 0,75 % tenía la mayor resistencia eléctrica.

3.6 Penetración rápida de cloruro

Uno de los asuntos más graves que pueden afectar a las estructuras de hormigón es la durabilidad, espe-

cialmente a medida que el tema de la sostenibilidad se vuelve cada vez más importante. Las estructuras duraderas sobreviven más tiempo que las que no, lo que garantiza la viabilidad de las estructuras de hormigón a largo plazo. La permeabilidad es el atributo más crítico del rendimiento a largo plazo de una estructura de hormigón reforzado. La distribución, el tamaño y la conectividad de las microfisuras y los huecos son las características microestructurales esenciales que determinan la permeabilidad del hormigón [40,41]. En este estudio se utilizó la penetración de cloruro del hormigón para medir la permeabilidad, ya que esta influye en la durabilidad. La Figura 9 muestra la penetración de iones cloruro de diversos hormigones con y sin fibras. La Figura 8 muestra los hallazgos de penetración rápida de iones cloruro determinados por la carga eléctrica transmitida en culombios a través de las fibras de MFP reforzadas en especímenes de hormigón. De acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C1202-12, la penetrabilidad del ion cloruro basada en las cargas pasadas se considera muy baja para valores entre 100 y 1.000 C, baja para valores entre 1.000 y 2.000 C, moderada para valores entre 2.000 y 4.000 C y alta para valores mayores de 4.000 C. Se puede ver que los valores obtenidos oscilan entre 230 y 290 C, que se podría considerar dentro del rango aceptable.

Figura 9. Penetración rápida de cloruros en mezclas de hormigón reforzadas con fibras MFP



La Figura 9 también muestra que la adición de fibras de MFP a las mezclas de hormigón reduce la penetración de los iones de cloruro. La adición de 0,25 %; 0,5 %; 0,75 %; 1 %; y 1,25 % de fibras de MFP a las mezclas de OPC a los 90 días da como resultado valores de carga aprobados de 248,1; 242,9; 241,5; 244,6; y 249,5 C, respectivamente, que son menores que el valor de carga aprobados de la mezcla de OPC de control de 251,3 C. De manera similar, se observaron valores de carga aprobados de 244; 240,1; 237; 238,4; y 245,5 C para las mezclas de POFA reforzadas con los mismos contenidos de fibra que son menores que los 245,8 C informados para la mezcla de POFA de control. En este contexto, Afroughsabet *et al.* [42] encontraron que la inclusión de fibras de PP redujo el coeficiente de migración de iones cloruro de cloruro de FRC, pero la adición de fibras de acero lo aumentó. La inclusión de materiales conductores tales como fibras de acero aumentan considerablemente el coeficiente de paso de cloruro del hormigón ya que la prueba de penetración rápida de cloruro está conectada a la corriente eléctrica que se desplaza sobre la matriz de hormigón.

Además, la Figura 10 muestra la relación entre la resistividad eléctrica y la penetración rápida de iones cloruro en mezclas de hormigón reforzadas con fibras de MFP. Pues tanto la primera como la segunda se correlacionaron linealmente con la bondad de ajuste

(R^2) de 0,7087, lo que indica la naturaleza confiable de los datos. Esta buena asociación se descubrió porque cuanto más significativa es la resistividad eléctrica, mejor es la durabilidad del hormigón, y cuanto menor es la penetración rápida del cloruro, mejor es la durabilidad del hormigón. En consecuencia, una correlación negativa entre los dos valores indica que las cualidades de durabilidad son suficientes.

La POFA, que tenía un tamaño de partícula más fino que el OPC, produjo la densificación de la matriz y llenó los orificios con productos de hidratación adicionales, como el gel C-S-H, lo que resultó en una disminución de la penetración de cloruro [43]. La cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se redujo debido al proceso de hidratación y al desarrollo de la actividad puzolánica de POFA. En consecuencia, el aumento del consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ condujo a la creación de un nuevo gel de C-S-H, que redujo el tamaño del vacío y dio como resultado una matriz más sólida con menor porosidad y profundidad de difusión. Las imágenes de MEB de los especímenes de hormigón OPC y POFA curados con agua e inmersión con cloruro se muestran en las Figuras 11 y 12, respectivamente. La formación de gel C-S-H se puede detectar en imágenes MEB de mezclas de hormigón curadas en agua, como se muestra en la Figura 11. La microestructura de las mezclas se alteró regularmente

a medida que continuaba el periodo de curado. Los geles C-S-H de la mezcla a base de POFA se conservan de forma más consistente que los de la mezcla a base de OPC tras 90 días de curado con agua. Varios cristales parecen cruzarse con el gel C-S-H en la mezcla de hormigón OPC. También se aprecian algunos espacios vacíos entre los cristales. La mezcla de POFA, por otro lado, contiene menos espacios y

más componentes de gel que el hormigón OPC. En la mezcla de POFA, se desarrolló una red de geles C-S-H, lo que resultó en una matriz más densa. Esto se atribuye al rendimiento puzolánico de POFA, que mejoró la microestructura de la matriz de hormigón al producir actividad puzolánica y la formación de geles C-S-H adicionales durante los tiempos de curado más largos [44].

Figura 10. Correlación entre la resistividad eléctrica y la penetración rápida de cloruro en las mezclas de hormigón

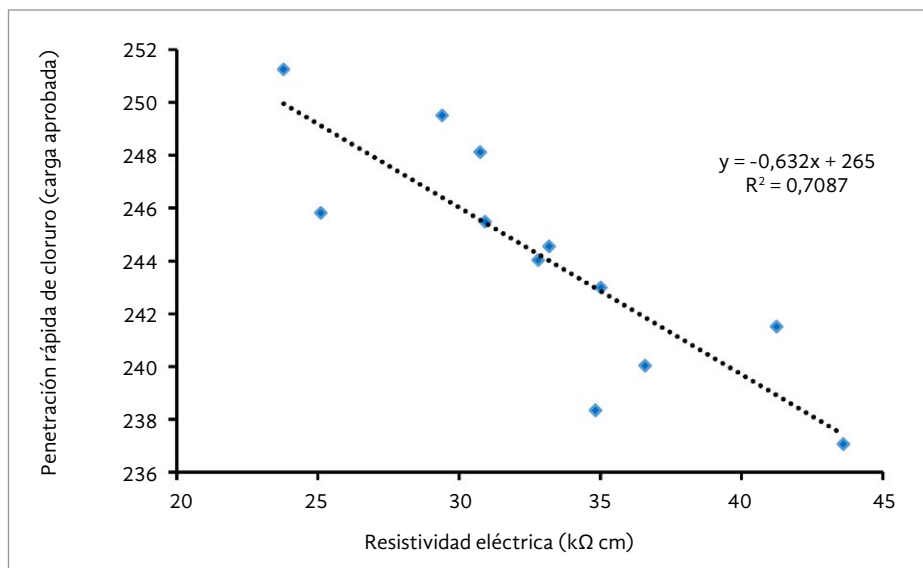


Figura 11. Imágenes de MEB de mezclas de hormigón OPC y POFA curadas en agua

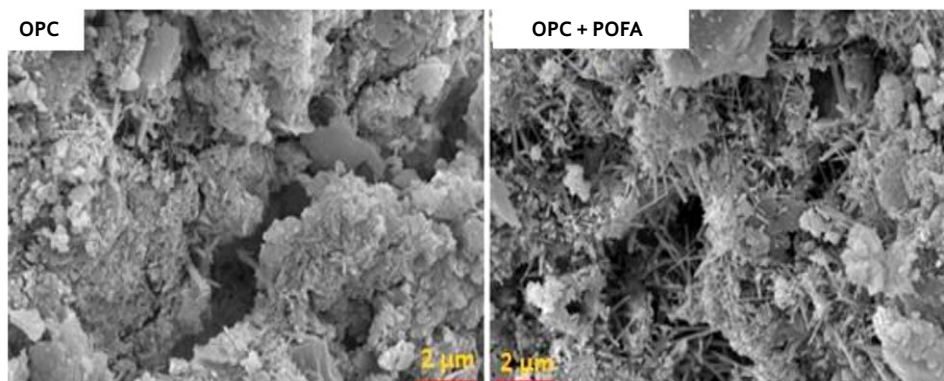
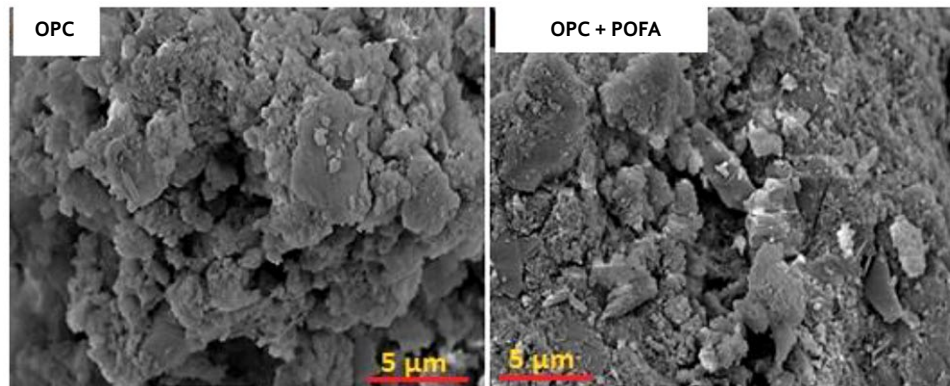


Figura 12. Imágenes de MEB de mezclas de hormigón OPC y POFA sumergidas en solución de NaCl al 5 %



La Figura 12 también demuestra alteraciones en la estructura celular de los especímenes sumergidos en solución de cloruro. Los huecos en forma de esfera en las mezclas de OPC se llenan gradualmente con partículas precipitadas adicionales a medida que avanza el tiempo de exposición. Sin embargo, cuando las mezclas que contenían POFA se sumergieron en solución de cloruro, los cristales de C-S-H adicionales formados debido a la actividad puzolánica de POFA se vieron menos perjudicados por el ataque de cloruro. La microestructura de la mezcla OPC es más variable que la de la mezcla POFA, lo que implica que la durabilidad del hormigón se ve comprometida. Como resultado, la presencia de POFA densificó la matriz, lo que resultó en una disminución del volumen de huecos y microfisuras y una durabilidad mejorada del hormigón.

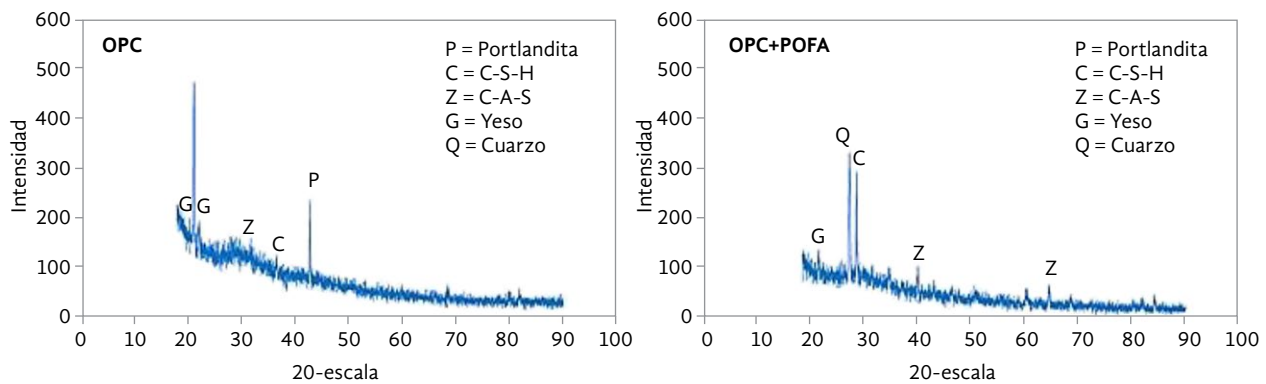
También se realizó un análisis de XRD en los especímenes de hormigón después de 90 días de curado y exposición a solución de cloruro para examinar la variación en la mineralogía de las muestras de concreto curadas en agua y sometidas a solución de cloruro. Los principales productos de hidratación para las curadas en agua, como se muestra en la Figura 13, son Portlandita (P), yeso (G) y cuarzo (Q) para especímenes de OPC y POFA, pero los cristales de hidrato de silicato de calcio (C-S-H) tienen una mayor intensidad en la mezcla de POFA. Cuando se substituyó el OPC por POFA, las intensidades del pico de Portlandita se redujeron significativamente, como se demuestra en el difractograma. Esto se debe

a un exceso de sílice reactiva en la mezcla de POFA, que se combina con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para generar un gel de C-S-H extra durante la fase de hidratación. Cuando el cemento se substituyó por POFA, las intensidades del pico de la muestra se redujeron, como se ve en la Figura 13. En la mezcla de POFA, el CH puede reaccionar químicamente con SiO_2 activo en cantidades significativas para formar geles C-S-H adicionales, lo que mejora la resistencia y durabilidad del hormigón. Como se ve en las figuras de XRD que ilustran POFA, la muestra está dominada por fuertes picos de C-S-H a $2\text{-}\theta$ de $28,8^\circ$. Debido a que crea un compuesto ininterrumpido que une las partículas de cemento en una masa cohesiva, el C-S-H es responsable de la mayoría de las cualidades de ingeniería del hormigón.

Además, se detectan trazas de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en los especímenes de POFA y OPC. La presencia de yeso en el cemento retrasa la reacción de C_3A al fraguado instantáneo. El yeso se descompone y se combina con el C_3A para generar etringita a medida que se introduce agua en la combinación ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). La etringita se forma a partir de cristales de grano muy fino que forman un recubrimiento en la superficie de las partículas C_3A [45].

Además, se realizó un análisis de XRD en las muestras de hormigón sumergidas en solución de cloruro, los hallazgos se muestran en la Figura 14. Los resultados del análisis de DRX demostraron que los iones cloruro penetraron en las muestras de hormigón e indujeron cambios morfológicos considerables en

Figura 13. Análisis de XRD en mezclas de hormigón OPC y POFA curadas en agua



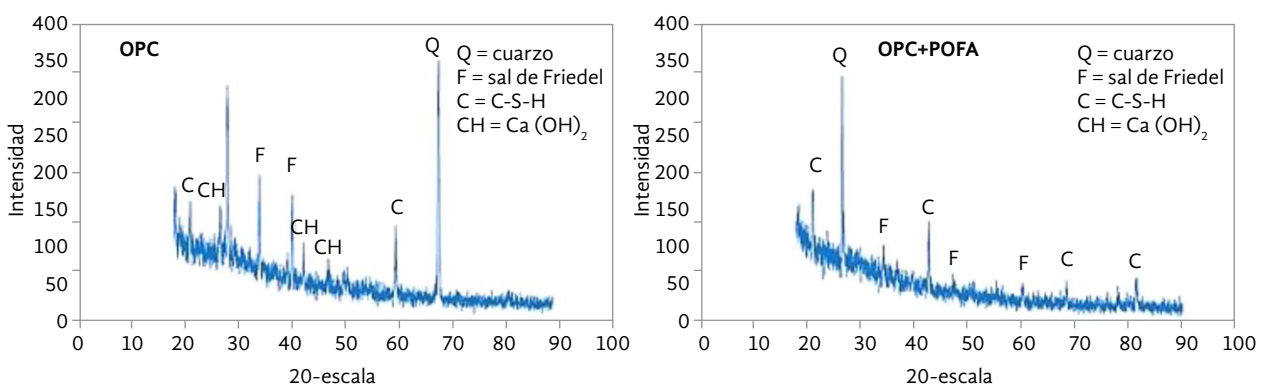
esas mezclas de cemento, principalmente en la OPC. La formación de la sal de Friedel mostró el desarrollo de nuevos componentes en la matriz debido al ataque de cloruro, y el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ siguió estando presente en la matriz después de la exposición al cloruro. Los datos de XRD muestran que la mezcla de OPC tiene una mayor intensidad de sal de Friedel que la mezcla de POFA, lo que podría deberse a la presencia de cavidades que permiten que los iones cloruro entren en la muestra de OPC. La adición de geles de C-S-H a las mezclas de POFA dio como resultado una matriz sólida con durabilidad mejorada y una tasa de penetración de cloruro más baja [46,47]. De acuerdo con el análisis de XRD, la sal de Friedel se encuentra en la muestra de POFA, aunque en una cantidad menor que en el espécimen de OPC.

4. Conclusiones

En este estudio se investiga el impacto de las fibras de envases de alimentos de lámina metalizada (MFP) a diferentes fracciones de volumen y de las cenizas de caldera de plantas de beneficio de palma de aceite como sustituto parcial del cemento en las propiedades de resistencia y durabilidad de los compuestos de hormigón. La investigación experimental arrojó los siguientes resultados:

- La inclusión de fibras de MFP en mezclas de hormigón redujo ligeramente la resistencia a la compresión. Por otro lado, la adición de aditivos minerales en el hormigón aumentó la resistencia a la compresión durante los tiempos de curado pro-

Figura 14. Imágenes de MEB de mezclas de hormigón OPC y POFA sumergidas en solución de NaCl al 5 %



longados. La POFA densificó la microestructura del hormigón y mejoró las propiedades del hormigón en periodos de curado más prolongados.

- Las fibras de MFP mejoraron la resistencia a la tracción del hormigón al tiempo que aumentaron significativamente su ductilidad. En general, cuanto mayor es el porcentaje de volumen de fibra en las mezclas de hormigón, más significativo es el aumento de la resistencia a la tracción. La unión entre las fibras y la matriz de cemento inhibió la propagación de microgrietas y mejoró el comportamiento posterior al agrietamiento del hormigón.
- Las fibras de MFP de hasta el 0,5 % en las mezclas de OPC redujeron la profundidad de carbonatación en aproximadamente 16 % después de 180 días de exposición al CO_2 . Debido a la reactividad puzolánica más lenta de POFA, la inclusión de esta en las mezclas de hormigón causó una mayor profundidad de carbonatación que las mezclas OPC.
- La contracción por secado de mezclas de hormigón reforzado con OPC y POFA fue influenciada considerablemente por fibras MFP en todas las fracciones de volumen. Para un material compuesto de hormigón que contenía 0,75 % de fibras de MFP y 20 % de POFA después de 180 días de prueba, la contracción por secado disminuyó en aproximadamente 30 %.
- La adición de fibras de POFA y de MFP a las mezclas de hormigón afectó sustancialmente su durabilidad. La mezcla de fibra MFP y POFA produjo simultáneamente la mejor durabilidad de todos los hormigones estudiados. En comparación con el hormigón OPC normal, la penetración de cloruro de la mezcla con 20 % de POFA y 0,75 % de fibras de MFP disminuyó en aproximadamente 10 % después de 90 días. Además, en comparación con la mezcla de control, la resistencia eléctrica de la misma combinación aumentó aproximadamente un 80 % a la misma edad.
- La investigación microestructural de la matriz OPC mostró huecos dispersos a través de la estructura de la pasta. La morfología de la pasta de POFA reveló compuestos densos, amorfos e impermeables, con partículas de ceniza sin reaccionar que sirvieron de relleno para producir una

matriz densa. La densificación de la matriz con más productos de hidratación se relacionó con la mayor eficiencia de durabilidad de los compuestos de hormigón.

- Con la adición de fibras de MFP se redujo la penetración de cloruro en la muestra de hormigón mientras se elevó su resistencia eléctrica. Los especímenes reforzados pueden clasificarse como de “alta” resistencia contra la penetración de cloruro y la “baja” tasa de corrosión de la barra de refuerzo en función de las pruebas de penetración de cloruro y resistividad eléctrica de 90 días.

Aportes de los autores: todos los autores contribuyeron al artículo por igual. Conceptualización: H. M., S. P. N. y R. A.; metodología, A. A. K. E., A. M. M. y R. A.; *software* S. P. N. y R. A.; validación, H. M., A. A. K. E. y R. A.; análisis formal, H. M., A. M. M. y R. A.; investigación, H. A., A. M. M. y R. A.; recursos, H. M., A. M. M. y R. A.; curaduría de datos, H. M. y R. A.; preparación del borrador original por escrito, H. M., H. A. y R. A.; redacción-revisión y edición, H. M., A. A. K. E. y R. A.; visualización, H. M. y S. P. N.; supervisión, H. A. y A. A. K. E.; administración de proyectos, R. A. y S. P. N.; adquisición de fondos, H. M. y R. A. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: los autores agradecen al Deputyship for Research & Innovation, Ministerio de Educación de Arabia Saudí, por financiar este trabajo de investigación a través del proyecto número IF-PSAU-2021/01/18918.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: no aplica.

Declaración de consentimiento informado: no aplica.

Declaración de disponibilidad de datos: los datos presentados en este estudio están disponibles a petición del autor correspondiente.

Reconocimientos: los autores agradecen el apoyo técnico recibido de la Universidad Príncipe Sattam Bin Abdulaziz (Arabia Saudí) y Universiti Teknologi Malaysia.

Conflicto de intereses: los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Referencias

1. Sun, C.; Chen, Q.; Xiao, J.; Liu, W. Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resour. Conserv. Recycl.* 2020, 161, 104930. [CrossRef]
2. Choudhary, J.; Kumar, B.; Gupta, A. Feasible utilization of waste limestone sludge as filler in bituminous concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 239, 117781. [CrossRef]
3. Mohammadhosseini, H.; Yatim, J. M.; Sam, A. R. M.; Awal, A. A. Durability performance of green concrete composites containing waste carpet fibers and palm oil fuel ash. *J. Clean. Prod.* 2017, 144, 448-458. [CrossRef]
4. Siddique, R.; Singh, G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing. *Resour. Conserv. Recycl.* 2011, 55, 885-892. [CrossRef]
5. Alaskar, A.; Alqarni, A. S.; Alfalah, G.; El-Sayed, A. K.; Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R. Performance evaluation of reinforced concrete beams with corroded web reinforcement: Experimental and theoretical study. *J. Build. Eng.* 2021, 35, 102038. [CrossRef]
6. Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Poi Ngian, S.; Tahir, M. M. Performance evaluation of sustainable concrete comprising waste polypropylene food tray fibers and palm oil fuel ash exposed to sulfate and acid attacks. *Crystals* 2021, 11, 966. [CrossRef]
7. Gu, L.; Ozbakkaloglu, T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Manag.* 2016, 51, 19-42. [CrossRef]
8. Sharma, R.; Bansal, P.P. Use of different forms of waste plastic in concrete-A review. *J. Clean. Prod.* 2016, 112, 473-482. [CrossRef]
9. Saikia, N.; de Brito, J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. *Constr. Build. Mater.* 2012, 34, 385-401. [CrossRef]
10. Albano, C.; Camacho, N.; Hernández, M.; Matheus, A.; Gutiérrez, A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Manag.* 2009, 29, 2707-2716. [CrossRef]
11. Eriksen, M.; Christiansen, J.; Daugaard, A. E.; Astrup, T. Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling. *Waste Manag.* 2019, 96, 75-85. [CrossRef] [PubMed]
12. Faraca, G.; Astrup, T. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. *Waste Manag.* 2019, 95, 388-398. [CrossRef] [PubMed]
13. Hahladakis, J. N.; Iacovidou, E. An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. *J. Hazard. Mater.* 2019, 380, 120887. [CrossRef]

14. Eriksen, M.; Astrup, T. Characterisation of source-separated, rigid plastic waste and evaluation of recycling initiatives: Effects of product design and source-separation system. *Waste Manag.* 2019, 87, 161-172. [CrossRef] [PubMed]
15. Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Lim, N. H. A. S.; Tahir, M. M.; Alabduljabbar, H.; Mohamed, A. M.; Samadi, M. Waste metalized film food packaging as low cost and ecofriendly fibrous materials in the production of sustainable and green concrete composites. *J. Clean. Prod.* 2020, 258, 120726. [CrossRef]
16. Mahmood, R. A.; Kockal, N. U. Cementitious materials incorporating waste plastics: A review. *SN Appl. Sci.* 2020, 2, 1-13. [CrossRef]
17. Buller, A. S.; Abro, F. U. R.; Lee, K.-M.; Jang, S. Y. Mechanical recovery of cracked fiber-reinforced mortar incorporating crystalline admixture, expansive agent, and geomaterial. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2019, 2019, 3420349. [CrossRef]
18. Liu, F.; Zhang, T.; Luo, T.; Zhou, M.; Ma, W.; Zhang, K. The effects of Nano-SiO₂ and Nano-TiO₂ addition on the durability and deterioration of concrete subject to freezing and thawing cycles. *Materials* 2019, 12, 3608. [CrossRef]
19. Yi, Y.; Zhu, D.; Guo, S.; Zhang, Z.; Shi, C. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment. *Cem. Concr. Compos.* 2020, 113, 103695. [CrossRef]
20. Paul, S. C.; Van Zijl, G. P.; Šavija, B. Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials* 2020, 13, 4562. [CrossRef]
21. Abro, F. U. R.; Buller, A. S.; Lee, K.-M.; Jang, S. Y. Using the steady-state chloride migration test to evaluate the self-healing capacity of cracked mortars containing crystalline, expansive, and swelling admixtures. *Materials* 2019, 12, 1865. [CrossRef] [PubMed]
22. Buller, A. S.; Abro, F. -U. -R.; Ali, T.; Jakhrani, S. H.; Ul-Abdin, Z. Stimulated autogenous-healing capacity of fiber-reinforced mortar incorporating healing agents for recovery against fracture and mechanical properties. *Mater. Sci.* **2021**, 39, 33-48. [CrossRef]
23. Alrshoudi, F.; Mohammadhosseini, H.; Md. Tahir, M.; Alyousef, R.; Alghamdi, H.; Alharbi, Y. R.; Alsaif, A. Sustainable use of waste polypropylene fibers and palm oil fuel ash in the production of novel prepacked aggregate fiber-reinforced concrete. *Sustainability* 2020, 12, 4871. [CrossRef]
24. Alnahhal, M. F.; Alengaram, U. J.; Jumaat, M. Z.; Alsubari, B.; Alqedra, M. A.; Mo, K. H. Effect of aggressive chemicals on durability and microstructure properties of concrete containing crushed new concrete aggregate and non-traditional supplementary cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 2018, 163, 482-495. [CrossRef]
25. Wang, W.; Shen, A.; Lyu, Z.; He, Z.; Nguyen, K. T. Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete-A review. *Constr. Build. Mater.* 2021, 296, 123734. [CrossRef]
26. Mujedu, K. A.; Ab-Kadir, M. A.; Ismail, M. A review on self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash as a cement replacement. *Constr. Build. Mater.* 2020, 258, 119541. [CrossRef]

27. Mohammadhosseini, H.; Alrshoudi, F.; Tahir, M. M.; Alyousef, R.; Alghamdi, H.; Alharbi, Y. R.; Alsaif, A. Durability and thermal properties of prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers. *J. Build. Eng.* 2020, 32, 101723. [CrossRef]
28. Turk, K.; Bassurucu, M.; Bitkin, R. E. Workability, strength and flexural toughness properties of hybrid steel fiber reinforced SCC with high-volume fiber. *Constr. Build. Mater.* 2021, 266, 120944. [CrossRef]
29. Zhang, P.; Li, Q. Fracture properties of polypropylene fiber reinforced concrete containing fly ash and silica fume. *Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2013, 5, 665-670. [CrossRef]
30. Li, Y.; Su, Y.; Tan, K. H.; Zheng, X.; Sheng, J. Pore structure and splitting tensile strength of hybrid Basalt-Polypropylene fiber reinforced concrete subjected to carbonation. *Constr. Build. Mater.* 2021, 297, 123779. [CrossRef]
31. Bao, H.; Yu, M.; Chi, Y.; Liu, Y.; Ye, J. Performance evaluation of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete under supercritical carbonation. *J. Build. Eng.* 2021, 43, 103159. [CrossRef]
32. Almeida, A. E. F. S.; Tonoli, G. H. D.; Santos, S. F.; Savastano, H., Jr. Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *Cem. Concr. Compos.* 2013, 42, 49-58. [CrossRef]
33. Tang, W. L.; Lee, H. -S.; Vimonsatit, V.; Htut, T.; Singh, J. K.; Hassan, W. N. F. W.; Ismail, M. A.; Seikh, A. H.; Alharthi, N. Optimization of micro and nano palm oil fuel ash to determine the carbonation resistance of the concrete in accelerated condition. *Materials* 2019, 12, 130. [CrossRef] [PubMed]
34. Mohammadhosseini, H.; Alrshoudi, F.; Tahir, M.M.; Alyousef, R.; Alghamdi, H.; Alharbi, Y. R.; Alsaif, A. Performance evaluation of novel prepacked aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibers at elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2020, 259, 120418. [CrossRef]
35. Karahan, O.; Atis, C. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Mater. Des.* 2011, 32, 1044-1049. [CrossRef]
36. Teng, S.; Afroughsabet, V.; Ostertag, C. P. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018, 182, 504-515. [CrossRef]
37. Wang, L.; Aslani, F. Electrical resistivity and piezoresistivity of cement mortar containing ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 2020, 263, 120243. [CrossRef]
38. Neville, A. M.; Brooks, J. J. *Concrete Technology*, 2da ed.; Longman Scientific & Technical: London, UK, 2010.
39. Lim, T. Y. D.; Teng, S.; Bahador, S. D.; Gjörv, O. E. Durability of very-high-strength concrete with supplementary cementitious materials for marine environments. *ACI Mater. J.* 2016, 113, 95-103. [CrossRef]

40. Zhang, M.; Li, H. Pore structure and chloride permeability of concrete containing nanoparticles for pavement. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 608-616. [CrossRef]
41. Abro, F. U. R.; Buller, A. S.; Ali, T.; Ul-Abdin, Z.; Ahmed, Z.; Memon, N. A.; Lashari, A. R. Autogenous Healing of Cracked Mortar Using Modified Steady-State Migration Test against Chloride Penetration. *Sustainability* 2021, 13, 9519. [CrossRef]
42. Afroughsabet, V.; Biolzi, L.; Monteiro, P. J. The effect of steel and polypropylene fibers on the chloride diffusivity and drying shrinkage of high-strength concrete. *Compos. Part B Eng.* 2018, 139, 84-96. [CrossRef]
43. Kroehong, W.; Damrongwiriyanupap, N.; Sinsiri, T.; Jaturapitakkul, C. The effect of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material on chloride penetration and microstructure of blended cement paste. *Arab. J. Sci. Eng.* 2016, 41, 4799-4808. [CrossRef]
44. Alnahhal, A. M.; Alengaram, U. J.; Yusoff, S.; Singh, R.; Radwan, M. K.; Deboucha, W. Synthesis of sustainable lightweight foamed concrete using palm oil fuel ash as a cement replacement material. *J. Build. Eng.* 2021, 35, 102047. [CrossRef]
45. Kroehong, W.; Sinsiri, T.; Jaturapitakkul, C.; Chindapasirt, P. Effect of palm oil fuel ash fineness on the microstructure of blended cement paste. *Constr. Build. Mater.* 2011, 25, 4095-4104. [CrossRef]
46. Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Md. Tahir, M. Towards sustainable concrete composites through waste valorisation of plastic food trays as low-cost fibrous materials. *Sustainability* 2021, 13, 2073. [CrossRef]
47. Alrshoudi, F.; Mohammadhosseini, H.; Alyousef, R.; Tahir, M.M.; Alabduljabbar, H.; Mustafa Mohamed, A. The impact resistance and deformation performance of novel pre-packed aggregate concrete reinforced with waste polypropylene fibres. *Crystals* 2020, 10, 788. [CrossRef]