



**Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE HORMIGONES POROSOS CON
ADICIÓN DE FIBRAS RECICLADAS DE POLIPROPILENO PARA
PAVIMENTOS PERMEABLES**

POR

PAULINA FRANCISCA GONZÁLEZ VÁSQUEZ

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Civil

Profesor guía
Oscar Link Lazo

2024
Concepción (Chile)

© 2024 Paulina Francisca González Vásquez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La expansión urbana ha llevado a la impermeabilización del suelo, incrementando la escorrentía superficial y las inundaciones, afectando tanto el ciclo hidrológico como la gestión de aguas urbanas. Este estudio aborda dicha problemática mediante la utilización de hormigones porosos con la incorporación estratégica de fibras recicladas de polipropileno, diseñados específicamente para pavimentos permeables. Una desventaja de estos hormigones es que la resistencia se ve disminuida debido a los huecos presentes en su estructura interna. En este contexto, se propone la introducción de fibras recicladas de polipropileno como una solución potencial. Al sustituir las fibras de plástico virgen por materiales reciclados, se busca no solo fortalecer las propiedades mecánicas del hormigón poroso, sino también abordar la problemática del exceso de plástico en el medio ambiente. La investigación se centra en evaluar el impacto de la adición de fibras de polipropileno provenientes de desechos, como mascarillas, maxisacos y tiras de embalaje, en las propiedades mecánicas e hidráulicas de los hormigones porosos. Se llevaron a cabo ensayos de compresión, flexotracción, abrasión y permeabilidad, junto con un análisis microestructural de mezclas patrones y con diferentes porcentajes de adición de fibras. Posteriormente, utilizando los porcentajes óptimos de adición de fibras obtenidos, se construyó una sección de pavimento. Los resultados indican que mezclas con un 0,05% de adición de diversas fibras recicladas son adecuadas para pavimentos permeables, aunque se observan diferencias en el comportamiento del hormigón poroso según el tipo de fibra. Mientras las fibras de mascarillas y tiras de embalaje mejoran las propiedades mecánicas, las de maxisacos muestran resistencias más bajas. La inclusión de fibras recicladas mejora las propiedades hidráulicas, demostrando su viabilidad y beneficios para pavimentos permeables.

ABSTRACT

Urban expansion has led to soil impermeabilization, increasing surface runoff and flooding, impacting both the hydrological cycle and urban water management. This study addresses this issue by using porous concretes with the strategic incorporation of recycled polypropylene fibers, specifically designed for permeable pavements. A drawback of these concretes is that their strength is reduced due to voids in their internal structure. In this context, the introduction of recycled polypropylene fibers is proposed as a potential solution. By substituting virgin plastic fibers with recycled materials, the aim is not only to strengthen the mechanical properties of porous concrete but also to address the issue of excess plastic in the environment.

The research focuses on evaluating the impact of adding polypropylene fibers from waste materials, such as masks, big bags, and packaging strips, on the mechanical and hydraulic properties of porous concretes. Compression, flexural, abrasion, and permeability tests were conducted, along with a microstructural analysis of standard mixtures with varying percentages of fiber addition. Subsequently, using the optimal fiber addition percentages obtained, a pavement section was constructed. The results indicate that mixtures with 0.05% addition of various recycled fibers are suitable for permeable pavements, although differences in the behavior of porous concrete are observed depending on the type of fiber. While mask and packaging strip fibers improve mechanical properties, big bag fibers show lower strengths. The inclusion of recycled fibers enhances hydraulic properties, demonstrating their feasibility and benefits for permeable pavements.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al proyecto “Sustainable and eco-efficient Pervious Concrete Pavements for Bikeways, Sidewalks, and Parking Lots for mitigating rainwater runoff and heat islands in urban areas” por el financiamiento de la presente investigación.

Expreso mi sincero agradecimiento al Laboratorio de Hormigones del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Concepción por la generosa disposición para el uso de sus instalaciones y a sus colaboradores por brindar su asistencia durante el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción por permitir el acceso a sus instalaciones y por facilitar el material necesario para llevar a cabo la presente investigación.

Quiero reconocer y agradecer a Rene Iribarren por su diligencia y eficacia en la gestión para la construcción de la sección de pavimento.

Agradezco a Joaquín Sepúlveda y al profesor Carlos Medina por su inestimable colaboración y por permitir el uso de los equipos en el laboratorio de fabricación del Centro para la Industria.

Agradezco al Dr. Bruno Urbano por proporcionar información crucial que contribuyó al desarrollo de esta investigación.

Agradezco al profesor guía de esta investigación, Oscar Link, por su orientación experta y apoyo continuo. Asimismo, agradezco al profesor Mauricio Padrena por su dedicación y respaldo en todas las fases de esta investigación.

INDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|------------|--|----|
| CAPÍTULO 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Motivación | 1 |
| 1.2 | Hipótesis | 2 |
| 1.3 | Objetivo general | 3 |
| 1.4 | Objetivos específicos | 3 |
| 1.5 | Metodología | 3 |
| 1.6 | Estructura de la tesis | 4 |
| CAPÍTULO 2 | FIBRAS EN HORMIGONES POROSOS | 5 |
| 2.1 | Introducción | 5 |
| 2.2 | Fibras en hormigones tradicionales | 5 |
| 2.2.1 | Residuos plásticos como reemplazo de fibras comerciales | 6 |
| 2.2.2 | Importancia del reciclaje del plástico | 7 |
| 2.3 | Hormigones porosos | 8 |
| 2.3.1 | Comportamiento del hormigón poroso con adición de fibras | 10 |
| 2.4 | Conclusión | 10 |
| CAPÍTULO 3 | METODOLOGÍA | 12 |
| 3.1 | Introducción | 12 |
| 3.2 | Materiales | 12 |
| 3.2.1 | Agua | 12 |
| 3.2.2 | Cemento | 12 |
| 3.2.3 | Agregado grueso | 13 |
| 3.2.4 | Agregado fino | 14 |
| 3.2.5 | Fibras recicladas | 14 |

| | | |
|-----------------------------|--|----|
| 3.3 | Métodos y ensayos | 15 |
| 3.3.1 | Procedimiento de conversión de materiales reciclados en fibras | 15 |
| 3.3.2 | Verificación del tipo de plástico en los materiales reciclados | 19 |
| 3.3.3 | Caracterización Mecánica de las Fibras | 20 |
| 3.3.4 | Dosificación | 21 |
| 3.3.5 | Confección, desmolde y curado de probetas | 22 |
| 3.3.6 | Confección Tramo de Prueba | 25 |
| 3.3.7 | Resistencia a la compresión | 28 |
| 3.3.8 | Resistencia a la Flexotracción | 28 |
| 3.3.9 | Resistencia a la abrasión..... | 29 |
| 3.3.10 | Microanálisis..... | 30 |
| 3.3.11 | Permeabilidad | 31 |
| 3.4 | Series experimentales..... | 34 |
| 3.5 | Conclusión | 36 |
| CAPÍTULO 4 RESULTADOS | | 38 |
| 4.1 | Introducción | 38 |
| 4.2 | Serie 0 | 38 |
| 4.3 | Serie 1 | 40 |
| 4.4 | Serie 2 | 44 |
| 4.4.1 | Evaluación de mezclas porosas con FBB y PSF | 44 |
| 4.4.2 | Evaluación combinación de fibras | 45 |
| 4.5 | Serie 3 | 47 |
| 4.6 | Comparación mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS..... | 49 |
| 4.7 | Serie 4 | 53 |

| | | |
|---------------------------------------|------------------|----|
| 4.8 | Serie 5 | 54 |
| 4.9 | Serie 6 | 57 |
| 4.10 | Conclusión | 60 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES | | 62 |
| REFERENCIAS | | 66 |
| ANEXO 4.1 RESULTADOS POR PRUEBA | | 78 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabla 3.1 | Caracterización cemento Biobío..... | 13 |
| Tabla 3.2 | Propiedades físicas gravilla 3/8..... | 13 |
| Tabla 3.3 | Propiedades físicas arena Biobío..... | 14 |
| Tabla 3.4 | Dimensiones fibras recicladas..... | 14 |
| Tabla 3.5 | Dosificación hormigón poroso..... | 22 |
| Tabla 3.6 | Series experimentales..... | 35 |
| Tabla 4.1 | Propiedades mecánicas de las fibras recicladas de polipropileno..... | 40 |
| Tabla 4.2 | Porcentajes de adición de fibras en mezclas de PC con combinación de fibras..... | 46 |
| Tabla 4.3 | Propiedades mecánicas e hidráulicas mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS..... | 49 |
| Tabla 4.4 | Propiedades hidráulicas en distintos puntos de medición del pavimento..... | 58 |
| Tabla A.4.1 | Resistencia a la tracción de las fibras estudiadas..... | 78 |
| Tabla A.4.2 | Resistencia a compresión a 7 días de mezclas con MF..... | 78 |
| Tabla A.4.3 | Resistencia a compresión a 28 días de mezclas con MF..... | 79 |
| Tabla A.4.4 | Resistencia a flexión a 28 días de mezclas con MF..... | 79 |
| Tabla A.4.5 | Permeabilidad 28 días de mezclas con MF..... | 80 |
| Tabla A.4.6 | Resistencia a la flexión a los 7 días..... | 80 |
| Tabla A.4.7 | Resistencia a la compresión a los 7 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF..... | 81 |
| Tabla A.4.8 | Resistencia a la compresión a los 28 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF..... | 82 |
| Tabla A.4.9 | Resistencia a la flexión a los 28 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF..... | 82 |
| Tabla A.4.10 | Permeabilidad los 28 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF..... | 83 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Tabla A.4.11 | Registro de las masas del ensayo a abrasión | 83 |
| Tabla A.4.12 | Tasa de infiltración en la sección de pavimento | 84 |
| Tabla A.4.13 | Permeabilidad con NCAT de la sección de pavimento | 85 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 3.1 | Fibras obtenidas de materiales desechados: (a) Fibras de mascarillas; (b) Fibras de maxisacos; (c) Fibras de tiras de embalaje. | 15 |
| Figura 3.2 | Procesamiento de mascarillas en fibras; (a) Extracción de elásticos y alambre nasal; (b) Equipo triturador rotatorio; (c) Incorporación de mascarillas al equipo; (d) Molienda de mascarillas | 17 |
| Figura 3.3 | Procesamiento tiras de embalaje; (a) Configuración Inicial: Bandas de Embalaje; (b) Tiras fraccionadas en segmentos de 50 mm de longitud; (c) Fibras seccionadas mediante guillotina | 19 |
| Figura 3.4 | Ensayo a tracción con máquina universal Zwick Roell Z005 | 20 |
| Figura 3.5 | Materiales pesados y betonera..... | 23 |
| Figura 3.6 | Desmolde y curado de probetas: (a) Desmolde de probetas prismáticas (b) Probetas en la cámara de curado | 24 |
| Figura 3.7 | Construcción pavimento permeable: (a) Trazado del perímetro; (b) Excavación; (c) Colocación base granular; (d) Moldaje y humedecimiento del suelo; (e) Compactación con rodillo | 27 |
| Figura 3.8 | Ensayo resistencia a flexotracción | 29 |
| Figura 3.9 | Microscopio JEOL JSM 6380LV. | 30 |
| Figura 3.10 | Acondicionamiento de probetas para ensayo de permeabilidad. | 32 |
| Figura 4.1 | Espectro FTIR-ATR de las fibras MF, BBF y PSF | 39 |
| Figura 4.2 | Espectro FTIR-ATR del polipropileno | 39 |
| Figura 4.3 | Propiedades mecánicas e hidráulicas de la incorporación de fibras de mascarillas a hormigones porosos. (a) Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. (b) Resistencia a la flexión a los 28 días. (c) permeabilidad a los 28 días. 41 | |
| Figura 4.4 | Resistencia a la flexión de las mezclas de hormigón poroso con adición de BBF y PSF..... | 45 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.5 | Resistencia a la flexión de las mezclas de hormigón poroso con combinación de fibras MF, BBF y PSF. | 46 |
| Figura 4.6 | Fig 6. Propiedades mecánicas e hidráulicas de la incorporación de BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF a hormigones porosos. (a) Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. (b) Resistencia a la flexión a los 28 días. (c) permeabilidad a los 28 días. | 47 |
| Figura 4.7 | Modos de falla hormigón reforzado con fibras | 51 |
| Figura 4.8 | Modos de falla probetas sometidas a flexión. (a) Probeta de la mezcla PC-5.0M. (b) Probeta de la mezcla PC-5.0BB. (c) Probeta de la mezcla PC-5.0PS..... | 52 |
| Figura 4.9 | Resistencia a la abrasión de las mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS..... | 53 |
| Figura 4.10 | Micrografías SEM de la mezcla PC-P | 54 |
| Figura 4.11 | Micrografías SEM de la mezcla PC-5.0M..... | 55 |
| Figura 4.12 | Micrografías SEM de la mezcla PC-5.0BB | 55 |
| Figura 4.13 | Micrografías SEM de la mezcla PC-5.0PS | 55 |
| Figura 4.14 | Representación de los puntos de medición de la sección de pavimento..... | 57 |
| Figura 4.15 | Propiedades hidráulicas de la sección de pavimento. (a) Permeabilidad; (c) Infiltración | 58 |

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La constante expansión de las áreas urbanas ha transformado drásticamente la topografía natural, reemplazando los suelos naturales por superficies impermeables como los pavimentos de asfalto y hormigón. Este cambio tiene consecuencias significativas como el incremento de la escorrentía superficial, las inundaciones e interrupción del ciclo hídrico natural (Chu *et al.*, 2010, Banasik *et al.*, 2008, Rojas, 2015, Da Silva *et al.*, 2022). La problemática se agrava con los efectos del cambio climático, que intensifican los eventos de precipitación extremos (Rojas *et al.*, 2014). Estos episodios no solo exacerban la situación de las inundaciones urbanas, sino que también colapsan las infraestructuras de drenaje y aumenta la saturación de los sistemas pluviales, convirtiéndose en un desafío urgente para la gestión de aguas urbanas (Baeza, 2008). Frente a esta problemática, es imperativo buscar soluciones innovadoras y sostenibles que aborden eficazmente las causas subyacentes de las inundaciones urbanas y mitiguen sus impactos adversos.

La importancia de este desafío se intensifica aún más al considerar el papel crucial del plástico en la crisis ambiental global. El plástico, omnipresente en la sociedad moderna, ha emergido como uno de los principales contribuyentes a la degradación ambiental y al cambio climático (Rodríguez, 2019). La producción masiva de plástico y su inadecuada eliminación generan una carga significativa de gases de efecto invernadero, contaminan océanos y ecosistemas, amenazan la vida silvestre y dan lugar a la proliferación de microplásticos.

Los hormigones porosos, diseñados específicamente para pavimentos permeables, presentan una solución innovadora y sostenible para mitigar las

inundaciones urbanas (Bright & Murugan, 2020). Su estructura interna permite el paso del agua a través de la superficie, facilitando la infiltración hacia las capas granulares. Este diseño no solo aborda la reducción de la escorrentía superficial, sino que también contribuye a recargar las napas subterráneas y reduce la saturación de los sistemas pluviales.

Sin embargo, la aplicación de hormigones porosos no está exenta de desafíos, especialmente en términos de resistencia mecánica (Ozel *et al.*, 2022). Es aquí donde la incorporación de fibras recicladas de plástico de polipropileno emerge como una solución estratégica. Al sustituir las tradicionales fibras de plástico virgen por materiales reciclados, no solo se busca fortalecer las propiedades mecánicas del hormigón poroso, sino que también se aborda directamente el problema del exceso de plástico en el medio ambiente.

Numerosos estudios respaldan la efectividad de la incorporación de fibras de plástico virgen en hormigones porosos, evidenciando mejoras sustanciales en resistencia a la compresión y flexión. Sin embargo, existen muy pocas investigaciones que aborden el uso de distintos tipos de desechos plásticos como fibras en hormigones porosos. Por tanto, se hace necesario evaluar cómo este tipo de pavimento se comporta al incorporarle fibras recicladas de plástico.

1.2 Hipótesis

La incorporación de fibras recicladas de polipropileno en la composición de hormigones porosos utilizados en secciones de pavimento fortalece las propiedades mecánicas, sin comprometer su capacidad hidráulica para permitir la infiltración de agua.

1.3 Objetivo general

Evaluar y comparar el comportamiento mecánico e hidráulico de hormigones porosos, analizando el efecto de la adición de distintos tipos de fibras recicladas de polipropileno en su uso como pavimentos permeables.

1.4 Objetivos específicos

- Caracterizar propiedades mecánicas y analizar el efecto de la microestructura de hormigones porosos mediante la incorporación de diferentes tipos de fibras recicladas de polipropileno.
- Evaluar la permeabilidad en probetas de hormigones porosos con adición de diferentes tipos de fibras recicladas de polipropileno.
- Evaluar propiedades hidráulicas en sección de pavimento con mezclas de hormigón poroso tradicional y con fibras recicladas de polipropileno.

1.5 Metodología

La investigación se desarrolló en un enfoque progresivo y detallado, dividido en siete series, que abarcan desde pruebas iniciales hasta evaluaciones más avanzadas y aplicadas de las propiedades de los hormigones porosos con diversas adiciones de fibras recicladas. La serie 0 consistió en el análisis mecánico y composición plástica de las fibras recicladas utilizadas. La serie 1 se enfocó en la evaluación mecánica e hidráulica de la incorporación de fibras recicladas de mascarillas en mezclas de hormigón poroso. En serie 2 se realizó un análisis preliminar para determinar los porcentajes óptimos de fibras de

maxisacos y zunchos (tiras de embalaje). Posteriormente, la Serie 3 seleccionó los porcentajes óptimos identificados en la Serie 2 y profundizó en la caracterización mecánica e hidráulica de estas mezclas. La serie 4 evaluó la resistencia a la abrasión de las mejores mezclas obtenidas de las series 1 y 2. La serie 5 se dedicó al análisis microestructural de las mezclas seleccionadas en la serie 4. Finalmente, la serie 6 culminó con la construcción de una sección de pavimento utilizando las mezclas óptimas de fibras, permitiendo la evaluación del rendimiento hidráulico en un contexto práctico y aplicado.

1.6 Estructura de la tesis

El presente informe está estructurado en cinco capítulos. El Capítulo 2 aborda el estado del arte de la investigación, incluyendo la problemática del plástico y las implicaciones de la impermeabilización de las superficies. En el Capítulo 3 se detalla la metodología empleada en este trabajo, presentando los materiales utilizados, la dosificación y los ensayos realizados. El cuarto capítulo expone los resultados obtenidos y su correspondiente análisis. Finalmente, el quinto capítulo engloba las conclusiones derivadas de este estudio.

CAPTULO 2 FIBRAS EN HORMIGONES POROSOS

2.1 Introducción

El hormigón, siendo un material ampliamente utilizado en construcción, destaca por su resistencia a la compresión, pero enfrenta desafíos significativos en términos de fragilidad bajo cargas de tracción y flexión. La incorporación de fibras en el hormigón ha surgido como una estrategia prometedora para abordar estas limitaciones, especialmente en aplicaciones donde la resistencia a la flexión es crucial. Diversos estudios respaldan la idea de que las fibras mejoran sustancialmente la resistencia a la flexión del hormigón, y este capítulo se centra en explorar específicamente el papel de las fibras en hormigones porosos.

Se examina la incorporación de fibras en hormigones tradicionales, resaltando la eficacia de este refuerzo para mejorar la capacidad del hormigón en soportar cargas de flexión y tracción. Además, se profundiza en la posibilidad de reemplazar fibras comerciales de plástico de polipropileno con residuos plásticos reciclados, ofreciendo una alternativa sostenible y contribuyendo a la mitigación de la crisis ambiental asociada al plástico. Se destaca la importancia del reciclaje del plástico, considerando su impacto negativo en el medio ambiente y su conexión con la crisis climática.

2.2 Fibras en hormigones tradicionales

El hormigón es uno de materiales más utilizado en el área de la construcción por sus excelentes propiedades mecánicas en términos de resistencia a la compresión. Sin embargo, presenta un comportamiento frágil ante cargas de tracción y flexión lo que se traduce en un mal desempeño bajo este tipo de cargas. Una de las estrategias más prometedoras para abordar estas

desventajas es la incorporación de fibras en la composición del hormigón. Varios autores han investigado y demostrado cómo la inclusión de fibras puede aumentar sustancialmente la resistencia a la flexión del hormigón.

Los estudios de Hsie *et al.* (2008), Yao *et al.* (2003) y Alani y Beckett (2013) respaldan la idea de que la incorporación de fibras en el hormigón es una estrategia efectiva para mejorar su resistencia a la flexión. Este refuerzo contribuye a la capacidad del hormigón para soportar cargas de flexión y tracción, lo que es significativo en aplicaciones de construcción donde se requiere una alta durabilidad y resistencia a las fuerzas mecánicas

2.2.1 Residuos plásticos como reemplazo de fibras comerciales

Las fibras empleadas para fortalecer la estructura del hormigón son comúnmente de plástico de polipropileno. Con el fin de reducir la constante producción de plástico y, de este modo, disminuir la dependencia del plástico virgen y las emisiones asociadas con su fabricación, se han explorado alternativas que permitan sustituir estas fibras de plástico virgen por materiales reciclados, aprovechando diversos desechos plásticos presentes en el entorno.

Varios autores han demostrado que el reciclaje de plástico ha contribuido a mejorar las propiedades del hormigón. Por ejemplo, Wang *et al.* (1994) y Naaman *et al.* (1996), lograron mejoras mediante el reciclaje de residuos industriales de alfombras. Meddah y Bencheikh (2009), Touhri *et al.* (2021), y Malek *et al.* (2020) utilizaron desechos de bolsas plásticas en sus investigaciones obteniendo mejoras en resistencia a la compresión y flexión.

2.2.2 Importancia del reciclaje del plástico

La importancia que tiene buscar alternativas para el reciclaje del plástico radica en que este material es uno de los actores principales en la creciente crisis del cambio climático y la degradación ambiental. Su impacto se manifiesta en varias formas, desde la producción e incineración del plástico que generan una carga significativa de gases de efecto invernadero, hasta su inadecuada eliminación que conduce a la contaminación de los océanos y ecosistemas, la pérdida de vida silvestre y la infiltración de partículas microplásticas en la cadena alimentaria (The natural Conservancy, 2020).

Las industrias del plástico se han convertido en la fuente más importante y de más rápido crecimiento de emisiones industriales de gases de efecto invernadero (Shen *et al.*, 2020). Según el Centro de Derecho Ambiental Internacional (CIEL, 2019), la emisión de gases de efecto invernadero están presentes en casi todo el ciclo de vida del plástico. La producción de plástico implica la extracción y procesamiento de recursos naturales, lo que conlleva un alto consumo de energía. Durante este proceso, se liberan gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. Asimismo, la incineración de plástico libera sustancias tóxicas y emisiones dañinas que afectan la calidad del aire y la salud de las personas (Nagy y Kuti, 2016., Verma *et al.*, 2016). Esta problemática se agrava considerando la magnitud de la producción de plástico a nivel global. Según datos de Buteler (2019), se generan anualmente más de 380 millones de toneladas de plástico en todo el mundo, donde menos del 10% del plástico desechado es reciclado cada año (OECD, 2022)

Algunas estimaciones establecen que el plástico constituye entre el 60 y 80 de los residuos marino, siendo el polietileno y el polipropileno los plásticos más

presentes (Íñiguez, 2019). La presencia de plástico en el medio ambiente conlleva consecuencias negativas, como lo señala Branese (2021), debido a la liberación de sustancias tóxicas que afectan las propiedades del suelo y del océano. Además, numerosos animales quedan atrapados o incluso mueren asfixiados por estos desechos, un fenómeno que se detecta de manera especialmente notable en 2020 y 2021, a raíz de la contaminación por mascarillas en el contexto de la pandemia de COVID-19 (Diario y Radio Universidad Chile, 2021; Patricio *et al.*, 2021; Neto *et al.*, 2021). Sin embargo, el peligro más insidioso radica en la degradación del plástico en partículas microscópicas conocidas como microplásticos. Este proceso ocurre debido a la exposición a la radiación solar, la acción del viento y las olas. Los microplásticos representan una grave amenaza, ya que los animales marinos los ingieren como si fueran alimentos. Estas partículas obstruyen el sistema digestivo de los animales o incluso perforan sus órganos, lo que a menudo resulta en la muerte, como sostiene Parker (2019).

2.3 Hormigones porosos

La constante urbanización y expansión de las ciudades han tenido un impacto significativo en el medio ambiente. Este fenómeno implica la sustitución de suelos naturales por superficies impermeables, como carreteras, edificios y aceras, lo que modifica masivamente las características de los terrenos. Como señalan Abellán (2016), Konrad (2003) y Feng *et al.* (2021), uno de los efectos más notorios de esta transformación es la reducción de la infiltración del agua en el suelo, lo que interrumpe y afecta el ciclo hídrico natural. Vidal y Romero (2010) mencionan que este fenómeno altera la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, pues la escorrentía de las superficies impermeables arrastra contaminantes, como aceites de motor, productos químicos y sedimentos.

Las implicaciones de la urbanización también se manifiestan durante los días de intensas precipitaciones, la impermeabilización de las calles resulta en un aumento en la escorrentía superficial, ocasionando inundaciones en las poblaciones (Pavez, 1999; Mulvaney, 2023). Esto también provoca la interrupción del sistema vial y la saturación de los sistemas de aguas lluvias.

A estos desafíos se suman los efectos del cambio climático, que contribuyen a episodios extremos de precipitación (Rojas *et al.*, 2014; Valenzuela, 2023; Rojas *et al.*, 2019; Eissa & Zaqui, 2011; Katyal y Pretisor, 2011). Lo que exacerba aún más el problema de las inundaciones urbanas.

Es en este contexto que los hormigones porosos han surgido como una solución innovadora en el diseño de pavimentos permeables. Según Carrasco *et al.* (2021), su estructura interna se describe como un conjunto de partículas de agregado grueso unidas entre sí por puentes constituidos por mortero, los que se encargan de proporcionar resistencia al hormigón. Este diseño de pavimento permite el paso del agua a través de su estructura, permitiendo la infiltración hacia las capas granulares. Kubba (2021) y Ang y Lihndal (2017) señalan que esta característica particular facilita la recarga de las napas subterráneas, reduce la escorrentía superficial y evita la saturación de los sistemas pluviales. Esto a su vez permite abordar problemas ambientales generados por el aumento en la construcción de superficies impermeables (Solminihac *et al.*, 2007).

Las propiedades hidráulicas que presentan este tipo de hormigón es debido a los huecos interconectados que se forman por la ausencia o mínima cantidad de arena que se incorpora a la mezcla. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, esta característica conlleva a menores resistencia que un hormigón convencional, por lo que su uso está limitado a pavimentos de bajo tránsito.

2.3.1 Comportamiento del hormigón poroso con adición de fibras

El enfoque de incorporar fibras a materiales cementicios es particularmente beneficioso para los hormigones porosos. Esto se debe a sus menores resistencias en comparación con un hormigón tradicional y a la inviabilidad de incorporar mallas de acero, ya que obstruirían la capacidad de drenaje del hormigón y, además, podrían ocasionar problemas de corrosión que contaminarían el agua que se infiltraría a los acuíferos. Por lo tanto, la alternativa de incorporar fibras en su matriz es una propuesta atractiva.

Varios estudios han demostrado que la incorporación de fibras de plástico virgen en el hormigón poroso produce mejoras sustanciales en sus propiedades mecánicas. Investigadores como Elavarasan, *et al.* (2022), Pils *et al.* (2019), Baskar *et al.* (2019), Bright & Murugan, (2020), Chavan *et al.* (2019), Aliabdo *et al.* (2018), Akand *et al.* (2018) han documentado notables avances en aspectos cruciales, en lo que respecta a la resistencia a la compresión como a la flexotracción del material. Estas investigaciones respaldan la eficacia de añadir fibras en la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón poroso, lo que lo convierte en una alternativa altamente promisorio para su uso en aplicaciones sostenibles y resistentes.

2.4 Conclusión

En este capítulo, se detalló el papel crucial de las fibras en hormigones porosos. Desde la mejora de las propiedades mecánicas hasta la posibilidad de incorporar fibras recicladas como alternativa a las fibras comerciales, se evidencia la versatilidad y potencialidad de esta estrategia de refuerzo. Se destaca la urgencia de abordar la crisis del plástico mediante el reciclaje y cómo la investigación en hormigones porosos con fibras recicladas se alinea con este propósito. La

conexión entre la degradación ambiental causada por el plástico y la mejora de las propiedades del hormigón poroso se presenta como una oportunidad para contribuir a la sostenibilidad ambiental y la ingeniería civil.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En el tercer capítulo de esta investigación, se presenta la metodología utilizada para llevar a cabo el estudio sobre hormigones porosos con la incorporación de fibras recicladas de polipropileno. Este capítulo se divide en secciones, cada una enfocada en aspectos específicos de la investigación tales como la descripción de los materiales utilizados, la obtención de fibras, los ensayos de resistencia a compresión, flexotracción, abrasión y permeabilidad. Además, se detalla el procedimiento de la confección de mezclas de hormigón poroso en probetas y la construcción de la sección de pavimento. Por último, se exponen cómo se organizan las series experimentales de la investigación.

3.2 Materiales

3.2.1 Agua

El suministro de agua empleado proviene de la red pública de agua potable proporcionada por la empresa Essbio. Este cumple con los requisitos normativos de calidad de agua en Chile, según la Norma Chilena 1498 (NCh 1498) (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2012)

3.2.2 Cemento

Se utiliza cemento Biobío Especial, obtenido mediante la molienda conjunta de clinker, puzolana y yeso. De acuerdo con la NCh 148 (INN,1968), este cemento

se clasifica como puzolánico de grado corriente. Las propiedades del cemento se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Caracterización cemento Biobío

| Propiedades | Magnitud |
|---|----------|
| Peso específico (g/cm ³) | 2,8 |
| Expansión en autoclave (%) | 0,1 |
| Fraguado inicial (h:m) | 2:40 |
| Fraguado final (h:m) | 3:40 |
| Resistencia a la compresión a los 7 días (kg/cm ²) | 320 |
| Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm ²) | 410 |

3.2.3 Agregado grueso

Los áridos gruesos utilizados corresponden a gravilla 3/8", adquiridos en la empresa Áridos HH ubicada en Concepción, Chile, los cuales son extraídos de la reviera del río Ñuble. Estos áridos cumplen con los requisitos generales estipulados en la normativa NCh 163 (INN, 1979). Las propiedades físicas de los áridos, obtenidas conforme a la norma NCh 1117 (INN, 2010), se detallan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Propiedades físicas gravilla 3/8

| Propiedades físicas | Valor |
|--|-------|
| Densidad real árido saturado superficialmente seco (kg/ m ³) | 2683 |
| Densidad real árido seco (kg/m ³) | 2643 |
| Densidad neta (kg/ m ³) | 2752 |
| Absorción de agua (%) | 1,49 |

3.2.4 Agregado fino

La arena utilizada corresponde a arena Biobío adquirida en la empresa Áridos HH ubicada en Concepción, Chile. Estos áridos cumplen con los requisitos generales estipulados en la normativa NCh 163 (INN, 1979). Las propiedades físicas de los áridos, obtenidas conforme a la norma NCh 1117 (INN, 2010), se detallan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Propiedades físicas arena Biobío

| Propiedades físicas | Valor |
|---|--------|
| Densidad real árido saturado superficialmente seco (kg/m ³) | 2728,9 |
| Densidad real árido seco (kg/m ³) | 2682,1 |
| Densidad neta (kg/m ³) | 2813,8 |
| Absorción de agua (%) | 1,75 |

3.2.5 Fibras recicladas

La Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción (UDT) suministró los materiales reciclados que posteriormente se utilizaron como fibras en este estudio. Estos materiales incluyen mascarillas quirúrgicas, maxi sacos y tiras de embalaje. Cabe destacar que, tras recibir los materiales de la UDT, se llevó a cabo un procesamiento específico para cada material para su posterior incorporación en los hormigones porosos objeto de investigación. Se presentan en la Tabla 3.4 las dimensiones de las fibras y en la Figura 3.1 imágenes de las fibras.

Tabla 3.4 Dimensiones fibras recicladas

| Fibra | Largo (mm) | Ancho (mm) | Relación de aspecto |
|------------------|------------|------------|---------------------|
| Mascarillas | 28 - 45 | 8 - 20 | 2,3 – 4,1 |
| Maxi sacos | 15 – 30 | 1,8 - 12,5 | 2,3 – 14,7 |
| Tira de embalaje | 50 | 0,9 – 2,0 | 25 - 55 |

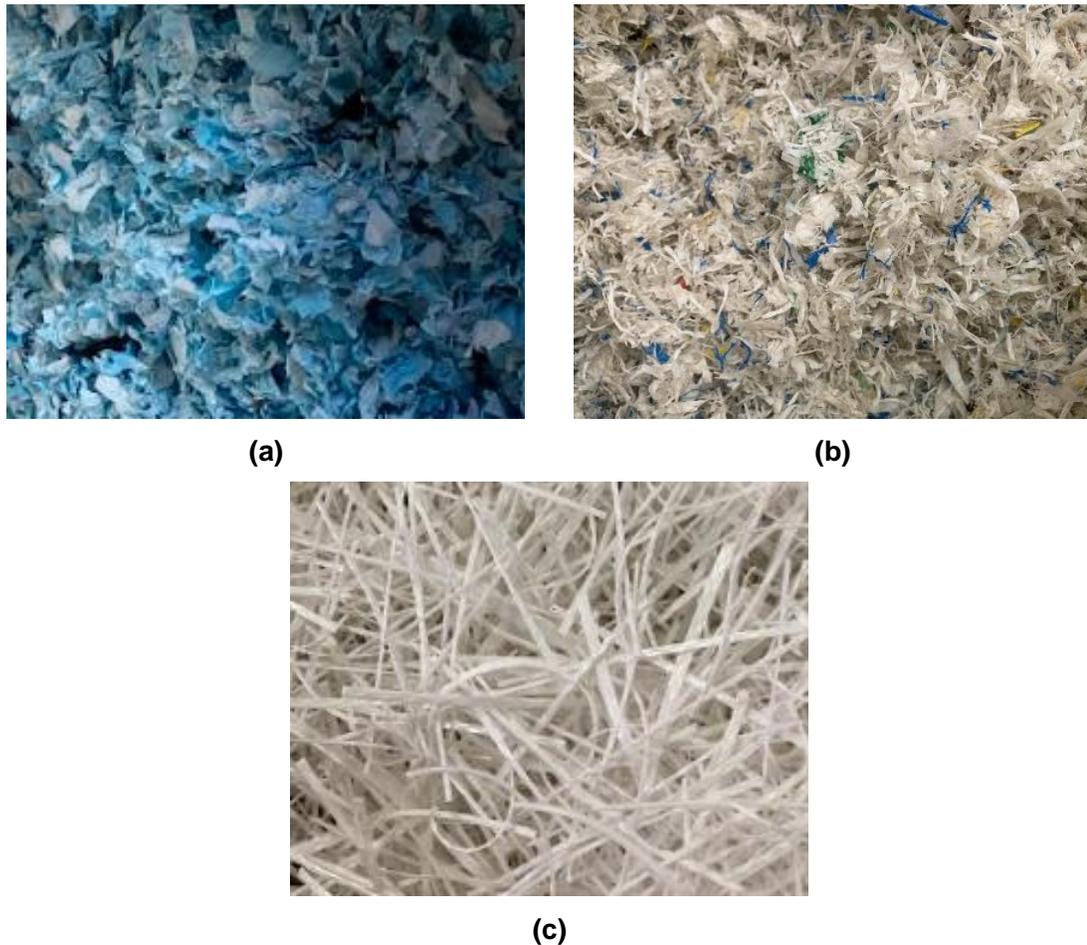


Figura 3.1 Fibras obtenidas de materiales desechados: (a) Fibras de mascarillas; (b) Fibras de maxisacos; (c) Fibras de tiras de embalaje.

3.3 Métodos y ensayos

3.3.1 Procedimiento de conversión de materiales reciclados en fibras

Mascarillas quirúrgicas:

El proceso de transformación de las mascarillas en fibras se llevó a cabo en las instalaciones de la UDT. Dado que las mascarillas estaban previamente utilizadas, se requirió realizar un procedimiento de desinfección antes de

manipularlas. Este proceso se realiza en una cámara de desinfección que consiste en un contenedor de volumen útil de tratamiento de 15 m³. La cámara está equipada con un sistema de recirculación de aire caliente, con un flujo de hasta 4500 m³/h, donde el aire es calentado mediante un calefactor eléctrico de paso. El equipo consta de sistemas de control de temperatura y está aislado térmicamente.

El procedimiento implica distribuir las mascarillas en los estantes abiertos de rejillas. Luego, se colocan los sensores de temperatura para el control correspondiente, y se procede a cerrar la cámara. Posteriormente, se inicia el sistema de recirculación de aire, que introduce aire caliente de manera que alcance al menos 100 °C por hora en todos los sensores. La desinfección completa tiene una duración aproximada de cuatro horas. Después, se procedió a la extracción de los elásticos y el alambre nasal, pues estos componentes no son de polipropileno. Una vez descontaminadas y desprovistas de los elementos no deseados, las mascarillas se sometieron a un proceso de trituración con un triturador rotatorio de bajas revoluciones, marca Untha, modelo RS 30-4-2 de 200kg/h de capacidad, reduciéndolas a tiras más pequeñas adecuadas para su incorporación en la fabricación de hormigones porosos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.2 Procesamiento de mascarillas en fibras; (a) Extracción de elásticos y alambre nasal; (b) Equipo triturador rotatorio; (c) Incorporación de mascarillas al equipo; (d) Molienda de mascarillas

Maxi sacos:

Con el fin de facilitar su procesamiento, en el mismo equipo utilizado para las mascarillas, se procedió a cortar los maxi sacos en trozos más manejables. Estos fragmentos fueron posteriormente introducidos en el equipo triturador, dando como resultado fibras de diversas dimensiones, tal como se ilustra en la Figura 3.1 (b). Destaca la prevalencia de fibras más pequeñas en el resultado final de este proceso debido a la incorporación de un tamiz de 20 mm en el equipo.

Tiras de embalaje:

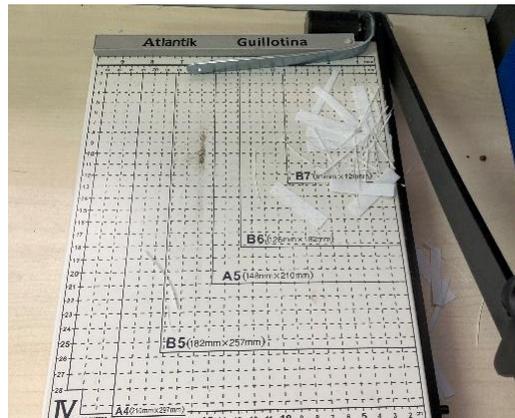
Las tiras de embalaje se recibieron según se muestra en la Figura 3.3 (a). Para adaptarlas a tamaños apropiados destinados a su uso como fibras, se llevó a cabo un proceso manual de reducción. Inicialmente, fueron seccionadas en tiras de 5 cm de longitud y posteriormente, mediante el uso de una guillotina, se realizaron cortes transversales para obtener tiras delgadas de aproximadamente 1 mm, como se detalla en la Figura 3.3 (b) y (c)



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3 Procesamiento tiras de embalaje; (a) Configuración Inicial: Bandas de Embalaje; (b) Tiras fraccionadas en segmentos de 50 mm de longitud; (c) Fibras seccionadas mediante guillotina

3.3.2 Verificación del tipo de plástico en los materiales reciclados

Con el objetivo de verificar que los desechos utilizados fueran de plásticos de polipropileno, el cual es el material empleado en las fibras vírgenes como aditivos en hormigones, se llevó a cabo un análisis de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourie de Reflectancia Total Atenuada (FTIR-ATR, por sus siglas en inglés). Este método de muestreo genera radiación infrarroja al introducirla en un cristal ATR transmisor de alto índice de refracción, permitiendo una reflexión interna total que genera una onda sobre la superficie del cristal. Dicha onda se extiende a la muestra que permanece en contacto con el cristal, y se registra el espectro infrarrojo resultante.

Esta técnica de espectroscopia infrarroja destaca como una herramienta de análisis que facilita la diferenciación rápida entre distintas clases de polímeros. Para asegurar la correcta identificación de la materia en estudio, se compara el espectro infrarrojo obtenido con el del material de referencia, en este caso,

polipropileno. La confirmación de la identidad se establece mediante una sólida correlación entre el espectro de la materia analizada y el del material de referencia

3.3.3 Caracterización Mecánica de las Fibras

La caracterización mecánica de las fibras de plástico reciclado se llevó a cabo en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción. Para obtener las distintas propiedades de los materiales reciclados, se siguieron los principios de la norma American Society for Testing and Materials D638 (ASTM,2014). En particular, se ensayó directamente el material en lugar de utilizar una probeta como dicta la norma y se consideró el requisito de realizar al menos cinco pruebas, a pesar de no ser un estándar absoluto en este caso.

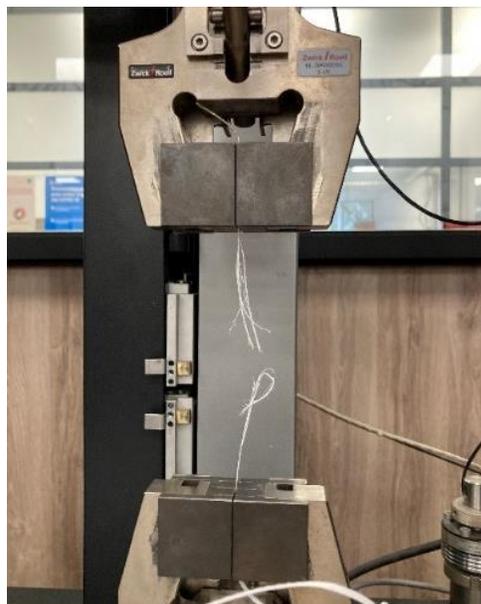


Figura 3.4 Ensayo a tracción con máquina universal Zwick Roell Z005

El ensayo se realizó utilizando una máquina de ensayo universal Zwick Roell Z005. Se procedió a cortar muestras de hilo plástico, midiendo su espesor y ancho para ingresar estos datos al programa testXpert II. Luego, se ajustó el hilo en la máquina y se ejecutó el ensayo a una velocidad constante hasta que se produjo la rotura en la zona central, se repitió este procedimiento para cada prueba.

3.3.4 Dosificación

La preparación de las mezclas de hormigón poroso en este estudio se llevó a cabo siguiendo una dosificación establecida, la cual se basó en la investigación realizada por Oviedo (2021). El autor se respaldó en el método establecido por Nguyen *et al.* (2014). Entre las diversas mezclas que Oviedo analizó en su investigación, se seleccionó la que demostró las propiedades más prometedoras en términos de resistencia a la flexotracción. Esta mezcla específica se caracteriza por una razón agua-cemento de 0,39 y una relación árido fino sobre árido grueso del 15%.

La Tabla 3.5 presenta la dosificación utilizada sin corrección por humedad. Esta dosificación se utilizó para el hormigón patrón. Las mezclas con adición de fibras recicladas de polipropileno utilizaron esta misma dosificación y se adicionó la cantidad de fibra respectiva.

Tabla 3.5 Dosificación hormigón poroso

Fuente: Oviedo (2021)

| Materiales | Dosis |
|---|---------|
| Agregado grueso (AG) (kg/m ³) | 1345,16 |
| Agregado fino (AF) (kg/m ³) | 201,75 |
| Cemento (C) (kg/m ³) | 345,31 |
| Agua (A) (kg/m ³) | 134,67 |
| A/C | 0,39 |
| AF/AG (%) | 15,00 |
| AG/C | 3,895 |
| AF/C | 0,584 |

3.3.5 Confección, desmolde y curado de probetas

Se utilizaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura y prismáticas de 15 cm de ancho y alto y 56 cm de largo, las que poseen volumen de 5,3 y 12,6 litros, respectivamente.

El proceso de confección de las muestras comienza con la determinación de las proporciones de los materiales a utilizar, de acuerdo con la cantidad de probetas a ser elaboradas. En primer lugar, se realiza la medición de la humedad de los áridos gruesos y finos de acuerdo con la norma NCh 1515 (INN, 1979), con el fin de ajustar las cantidades en función de su contenido de humedad y absorción. A continuación, se procede a pesar de cada uno de los materiales y se inicia la confección de la mezcla, la cual es amasada en una betonera.

Primero, se le añaden los áridos gruesos junto con el cemento. Luego, se detiene la betonera para incorporar el árido fino. Mientras la betonera está en funcionamiento y hasta que los áridos estén cubiertos con el cemento, se continúa con la adición del agua. Inicialmente, se agrega el 80% del agua y

posteriormente se agrega el resto de manera gradual. La mezcla se mantiene en movimiento durante aproximadamente 5 minutos. Para las mezclas con adición de fibras, se agregan en pequeñas cantidades mientras la betonera está en funcionamiento, con el objetivo de lograr una distribución uniforme en toda la mezcla. El hormigón fresco se considera listo una vez que todos los componentes se han incorporado de manera uniforme.



Figura 3.5 Materiales pesados y betonera

Una vez completado el proceso de confección de la mezcla, se procede con la etapa de llenado de los moldes. Las probetas cilíndricas se llenan en tres capas de espesor uniforme, mientras que las probetas prismáticas se llenan en dos capas de igual espesor. La compactación, se realiza siguiendo el procedimiento establecido en la norma NCh 1017 (INN, 1975). Para las probetas cilíndricas, la compactación se realiza en tres capas de igual espesor, y cada capa se apisona mediante 25 golpes, distribuidos de manera uniforme. En cuanto a las probetas prismáticas, se compactan en dos capas de espesor uniforme, y cada capa se apisona con ocho golpes por cada 100 cm² de superficie, lo que implica un total

de 66 golpes por capa, de acuerdo con las dimensiones de los moldes prismáticos empleados.

Por último, se enrasa la superficie del hormigón porosos con platacho de madera y luego se cubren las probetas con una lámina de polietileno transparente para dejarlas fraguar por 48 horas. Transcurrido el tiempo de fraguado se realiza el desmolde y etiquetado de cada probeta. Se trasladan a la cámara de curado que presenta una humedad sobre el 95% y temperatura entre 17 y 23°C. Las probetas quedan en la sala de curado hasta la edad de ensayo que corresponda.



(a)



(b)

**Figura 3.6 Desmolde y curado de probetas: (a) Desmolde de probetas prismáticas
(b) Probetas en la cámara de curado**

3.3.6 Confección Tramo de Prueba

Se ejecutó la construcción de una sección de pavimento destinada a un estacionamiento para un vehículo de dimensiones 2,50 m x 5,00 m. El estacionamiento se diseñó con tecnología de losas cortas, la cual proporciona beneficios sustanciales en términos de durabilidad y resistencia. La sección de pavimento se compone de cuatro losas cortas, cada una de dimensiones de 1,25 x 2,50 m y un espesor de 150 mm. El diseño estructural se base en lo establecido por Ferrada (2023), indicando que para losas cortas la resistencia mínima a la flexotracción debe ser de 1.5 MPa.

Las mezclas de hormigón poroso para las losas se definieron en base a los resultados más destacados obtenidos en las series 1 y 2 de la investigación. Cada losa se construyó con los porcentajes óptimos de fibras en términos de flexotracción, utilizando hormigón poroso; patrón, con fibras de mascarillas, maxi sacos y tiras de embalaje.

La construcción del pavimento siguió las especificaciones técnicas establecidas por Villar (2023). En primer lugar, se realizó el trazado del perímetro del estacionamiento, que debía ser mayor a las dimensiones establecidas para el mismo. Posteriormente, se procedió con el movimiento de tierra, realizando la excavación con las dimensiones especificadas del pavimento y un espesor de 150 mm. Respecto a las capas granulares del paquete estructural, no se compactaron para no afectar la permeabilidad, simplemente se niveló la superficie de la base y subbase.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.7 Construcción pavimento permeable: (a) Trazado del perímetro; (b) Excavación; (c) Colocación base granular; (d) Moldaje y humedecimiento del suelo; (e) Compactación con rodillo

Una vez que las capas granulares estuvieron debidamente niveladas, se llevó a cabo la colocación del moldaje diseñado estratégicamente para facilitar la construcción de las losas cortas del área de estacionamiento. Previamente a la colocación del hormigón, se procedió a humedecer la base granular para así favorecer a la resistencia del pavimento y evitar fallas prematuras del mismo.

El hormigonado se realizó de manera continua sobre la base teniendo en consideración la colocación de las barras de acero, utilizadas como barras de amarre, con dimensiones de 12 mm y 25 mm. Después del vertido del hormigón, se procedió con el proceso de compactación mediante un rodillo de acero de ancho superior al de la losa, el cual fue diseñado por Ferrada (2023). Se aplicaron cuatro pasadas con el rodillo, cuya presión de compactación corresponde a 0.065 MPa. Tras la compactación, se llevó a cabo el enrase con el propósito de realizar

ajustes locales, tanto en sobre espesores como en depresiones locales. Concluyendo esta etapa, se implementó el curado del concreto de manera inmediata, el que consistió en la cobertura total de la superficie y sus costados con polietileno de alta densidad, el que debía permanecer por al menos 7 días.

3.3.7 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del hormigón poroso estándar y del hormigón poroso con la adición de fibras recicladas de polipropileno fue caracterizada mediante ensayos de compresión en probetas cilíndricas a 7 y 28 días de edad del hormigón en estudio. El método de ensayo establecido se rige por la norma NCh 1037 (INN,2009), y su ejecución se llevó a cabo utilizando la máquina de ensayo universal Controls Sercomp 7 LH 01.00.A, la cual está ubicada en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción. Cabe destacar que los resultados de cada mezcla analizada se obtuvieron como el promedio simple de 5 repeticiones de probetas ensayadas.

3.3.8 Resistencia a la Flexotracción

La resistencia a la flexotracción de los hormigones, tanto los patrones como aquellos con adición de fibras recicladas, fue evaluada a los 7 y 28 días, correspondientes a la serie 2, así como a las series 1 y 3, respectivamente. La medición de esta propiedad se llevó a cabo mediante el ensayo de tracción por flexión, conforme a la norma NCh 1018 (INN, 2009). Se utilizó la máquina de ensayo universal Controls Sercomp 7 LH 01.00.C. Para la serie 2 se realizaron tres probetas para cada mezcla en análisis, mientras que para las etapas 1 y 3 se confeccionaron cinco pruebas.



Figura 3.8 Ensayo resistencia a flexotracción

3.3.9 Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión se evaluó a los 28 días de edad del hormigón con mezcla patron y las mezclas con porcentajes de fibras mascarillas, maxisacos y tiras de embalaje, que hayan entregado los mejores resultados en términos de resistencia a flexotracción. Esta propiedad mecánica se determina mediante el método de prueba estándar ASTM C1747 (2011) para evaluar la resistencia potencial a la degradación del concreto permeable por impacto y abrasión.

EL Procedimiento aplicado consistió en introducir simultáneamente tres probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 10 cm de altura en la máquina de desgaste de Los Ángeles, sin la incorporación de las bolas de acero, el ensayo se ejecuta hasta completar 500 revoluciones. La pérdida de masa se calcula con la Ecuación

$$PL = 100 \cdot \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \quad (1)$$

Donde:

PL : pérdida en masa en %.

W_1 : masa inicial de la probeta.

W_2 : masa final de la probeta.

3.3.10 Microanálisis

El análisis microscópico de la estructura del hormigón poroso, tanto estándar como con adición de los distintos tipos de fibras recicladas utilizadas, se realizó a través de microscopía electrónica de barrido (SEM). El ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Microscopía de la Universidad de Concepción utilizando un microscopio JEOL JSM 6380LV.

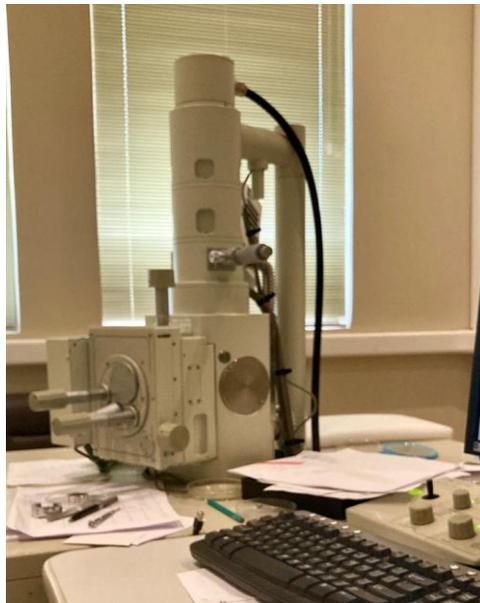


Figura 3.9 Microscopio JEOL JSM 6380LV

Para la ejecución del ensayo, se fabricaron probetas cilíndricas las cuales al cumplir 28 días de curado se sometieron a ensayo de compresión hasta romper la probeta por completo. Luego, se seleccionaron trozos representativos del hormigón que contienen los componentes de interés, como áridos, fibras y la matriz de cemento. Estos fragmentos se preparan recubriéndolos con una fina capa de oro y se colocan en el portamuestra del microscopio. Este dispositivo, mediante un haz de electrones, impactó y escaneó la superficie de la muestra, capturando imágenes en alta resolución

3.3.11 Permeabilidad

Para evaluar la permeabilidad en las probetas fabricadas en laboratorio y en la sección de pavimento construida, se realizaron mediciones basadas en la prueba de permeabilidad de carga variable especificada en ACI 522r (2010). En el análisis de laboratorio, se sometieron tres probetas de cada mezcla de hormigón poroso en estudio a la prueba de permeabilidad.

El procedimiento comienza con el acondicionamiento de la probeta, cubriéndola lateralmente con filme plástico y sellándola con cinta adhesiva en los bordes del cilindro, según se visualiza en la Figura 3.10. Para extraer la probeta del permeámetro, se colocaron alambres estratégicamente. Una vez introducida la probeta dentro del permeámetro, se sellan los bordes con goma eva para evitar filtraciones y asegurar estanqueidad en el espacio existente entre el PVC y la muestra. Posteriormente, se instala la parte superior del permeámetro y se procede con las mediciones, que consiste en determinar el tiempo que tarda el agua en descender entre alturas específicas, repitiendo tres veces la medición por cada probeta.



Figura 3.10 Acondicionamiento de probetas para ensayo de permeabilidad

En la sección de pavimento, se utilizó un permeámetro NCAT y anillo de infiltración. La medición se realizó a cada una de las losas cortas, repitiendo la medición tres veces por losa. Para el ensayo utilizando el permeámetro NCAT el proceso inicia volteando el permeámetro, limpiando la base y aplicando masilla alrededor de la circunferencia para sellar. Luego, el permeámetro se vuelve a su posición normal y se procede a situarlo en el área donde se llevará a cabo la medición en el pavimento. Sobre la base cuadrada del permeámetro se colocan cuatro mancuernas de 5 kg cada una como contrapeso. Finalmente, se vierte agua en el dispositivo y se realiza la medición determinando el tiempo que tarde el agua en descender entre alturas determinadas. El coeficiente de permeabilidad se determina con la Ecuación 2.

$$k = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2)$$

Donde:

k : Coeficiente de permeabilidad.

a : Área tubo de admisión.

A : Área de la muestra.

L : largo de la muestra.

h_1 : Altura inicial de agua.

h_2 : Altura final de agua.

t : Tiempo que demora entre h_1 y h_2 .

Por otro lado, mediante el método de prueba estándar para la tasa de infiltración en hormigón permeable in situ, establecido en la norma ASTM C1701 (2017) la medición de la permeabilidad se lleva a cabo utilizando un anillo de infiltración de aluminio con un diámetro de 294 mm.

El procedimiento consiste, en primer lugar, en limpiar la superficie del pavimento. Luego, se aplica masilla alrededor del borde inferior del anillo y se coloca este sobre la superficie del pavimento asegurándose de que la masilla forme un sello hermético. La cantidad de agua necesaria para realizar el ensayo se determina según las condiciones de permeabilidad del pavimento. Finalmente, se vierte el agua y se empieza a cronometrar tan pronto como esta impacta la superficie del pavimento; se detiene cuando ya no hay agua libre en la superficie permeable. La tasa de infiltración se calcula utilizando la ecuación 3.

$$I = \frac{KM}{D^2t} \quad (3)$$

Donde:

I : Tasa de infiltración, mm/h.

M : Masa de agua, kg.

D : Diámetro del anillo de infiltración, mm.

t : Tiempo necesario para que se infiltre la cantidad medida de agua, s.

K : Factor 4583666000 mm³ s/kg h.

3.4 Series experimentales

La investigación se llevó a cabo en siete series experimentales. La serie 0 consistió en la caracterización mecánica y en el análisis de composición plástica de las fibras recicladas utilizadas. La serie 1, se enfocó en el análisis del comportamiento mecánico e hidráulico de las mezclas de hormigón poroso que contenían adiciones de fibras de mascarillas recicladas. Dentro de esta serie experimental, se elaboraron y evaluaron probetas patrón, así como probetas que contenían un 0,1% y 0,05% de fibras recicladas de mascarillas. La serie 2 comprendió una evaluación de resistencia a flexotracción a los 7 días mediante la fabricación de probetas de hormigón poroso patrón, con un 0,025% y 0,05% de fibras recicladas de maxisacos, con un 0,05% y 0,075% de fibras recicladas de tiras de embalaje y mezclas con combinación de fibras de tiras de embalaje con fibras de mascarillas y maxisacos; una mezcla con 0,035 % de fibras de tiras de embalaje combinada con 0,015% de fibras de mascarillas y otra mezcla con 0,035 % de fibras de tiras de embalaje combinada con 0,015% de fibras de maxisacos.

La serie 3 se enfocó en la caracterización de las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas con 0,05% de fibras de maxisacos, 0,05% de fibras de tiras de embalaje y la mezcla con fibras combinadas de tiras de embalaje y mascarillas. La serie 4 se dedicó a evaluar la resistencia a la abrasión de las mezclas con 0,05% de adición de fibras de mascarillas, maxisacos y tiras de embalaje. En la serie 5, se realizó la evaluación microestructural de las mismas mezclas seleccionadas en la serie 4. Por último, en la serie 6 se llevó a cabo la evaluación de la sección de pavimento con las mezclas con 0,05% de adición de fibras de mascarillas, maxisacos y tiras de embalaje y mezcla de hormigón poroso patrón.

La Tabla 3.6 presenta las series experimentales de las mezclas de hormigones porosos, donde 'E' denota el número de experimento de la serie, 'ID' representa la identificación única de cada mezcla. 'MF' se refiere a la fibra de mascarillas (MF por Mask Fiber en inglés), 'BBF' a la fibra de maxisacos (Big Bags Fiber), y 'PSF' a la fibra de tiras de embalaje (Packaging Strips Fiber). Los indicadores 'C', 'F', 'A', 'S', 'P', e 'I' corresponden respectivamente a la resistencia a la compresión, resistencia a flexotracción, resistencia a la abrasión, análisis microestructural SEM, ensayo de permeabilidad e infiltración.

La identificación utilizada para las mezclas sigue el formato 'PC-XY', donde 'PC' representa hormigón poroso (Porous Concrete en inglés), 'X' indica el porcentaje de adición de fibra, e 'Y' corresponde a la fibra utilizada (M para mascarillas, BB para maxisacos, PS para tiras de embalaje). Para el hormigón poroso patrón, se emplea la nomenclatura 'PC-P'. La designación 'PC-Y1-Y2' se refiere a mezclas que incorporan combinaciones de fibras, donde 'Yx' representa las fibras utilizadas. La notación 'S-PC-Y' hace referencia a las mezclas destinadas a la sección de pavimento, donde 'S' indica losa (Slab en inglés) e 'Y' representa la concentración óptima de cada adición de fibra.

Tabla 3.6 Series experimentales

| Serie | E | ID | MF | BBF | PSF | C | F | A | S | P | I |
|-------|----------|----------|--------|--------|--------|------|----|----|----|----|----|
| 1 | 1 | PC-P | 0 | 0 | 0 | 7/28 | 28 | - | - | 28 | - |
| | 2 | PC-10M | 0,100% | 0 | 0 | 7/28 | 28 | - | - | 28 | - |
| | 3 | PC-5.0M | 0,050% | 0 | 0 | 7/28 | 28 | - | - | 28 | - |
| 2 | 1 | PC-P | 0 | 0 | 0 | - | 7 | - | - | - | - |
| | 2 | PC-2.5BB | 0 | 0,025% | 0 | - | 7 | - | - | - | - |
| | 3 | PC-5.0BB | 0 | 0,050% | 0 | - | 7 | - | - | - | - |
| | 4 | PC-5.0PS | 0 | 0 | 0,050% | - | 7 | - | - | - | - |
| | 5 | PC-7.5PS | 0 | 0 | 0,075% | - | 7 | - | - | - | - |
| | 1 | PC-M-PS | 0,015% | 0 | 0,035% | - | 7 | - | - | - | - |
| 2 | PC-BB-PS | 0 | 0,015% | 0,035% | - | 7 | - | - | - | - | |
| 3 | 1 | PC-5.0BB | 0 | 0,050% | 0 | 7/28 | 28 | - | - | 28 | - |
| | 2 | PC-5.0PS | 0 | 0 | 0,050% | 7/28 | 28 | - | - | 28 | - |
| | 3 | PC-M-PS | 0,015% | 0 | 0,035% | 7/28 | 28 | - | - | 28 | - |
| 4 | 1 | PC-P | 0 | 0 | 0 | - | - | 28 | - | - | - |
| | 2 | PC-5.0M | 0,050% | 0 | 0 | - | - | 28 | - | - | - |
| | 3 | PC-5.0BB | 0 | 0,050% | 0 | - | - | 28 | - | - | - |
| | 4 | PC-5.0PS | 0 | 0 | 0,050% | - | - | 28 | - | - | - |
| 5 | 1 | PC-P | 0 | 0 | 0 | - | - | - | 28 | - | - |
| | 2 | PC-5.0M | 0,050% | 0 | 0 | - | - | - | 28 | - | - |
| | 3 | PC-5.0BB | 0 | 0,050% | 0 | - | - | - | 28 | - | - |
| | 4 | PC-5.0PS | 0 | 0 | 0,050% | - | - | - | 28 | - | - |
| 6 | 1 | S-PC-P | 0 | 0 | 0 | - | - | - | - | 28 | 28 |
| | 2 | S-PC-M | 0,050% | 0 | 0 | - | - | - | - | 28 | 28 |
| | 3 | S-PC-BB | 0 | 0,050% | 0 | - | - | - | - | 28 | 28 |
| | 4 | S-PC-PS | 0 | 0 | 0,050% | - | - | - | - | 28 | 28 |

3.5 Conclusión

En resumen, la metodología implementada en este estudio sienta las bases para una evaluación precisa y detallada de los hormigones porosos con fibras recicladas de polipropileno. Cada serie experimental, desde la caracterización de

las fibras hasta la evaluación mecánica e hidráulica del hormigón poroso, tanto en el laboratorio como in situ, se ejecutó con rigurosidad para obtener resultados confiables y significativos. Además, esta metodología proporciona la base esencial para los resultados obtenidos de la investigación, tal como se explorará en el próximo capítulo.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

Este capítulo presenta los resultados derivados de la evaluación de hormigones porosos que incorporan fibras recicladas de mascarillas, maxisacos y tiras de embalaje. Incluye un análisis detallado de los resultados y comparaciones entre la mezcla patrón y aquellas con adición de fibras recicladas.

La estructura del capítulo se compone de ocho secciones, alineadas con las siete series experimentales descritas en el Capítulo 3, y una sección adicional donde se realiza un análisis minucioso y comparativo de las mezclas con fibras utilizadas en la construcción de la sección de prueba.

4.2 Serie 0

4.2.1 Análisis FTIR-ATR

Los resultados de los espectros derivados del análisis FTIR-ATR de las fibras MF, BBF y PSF se presentan en la Figura 4.1. Estos espectros se comparan con el espectro de polipropileno, que se muestra en la Figura 4.2 (Velandia, 2017).

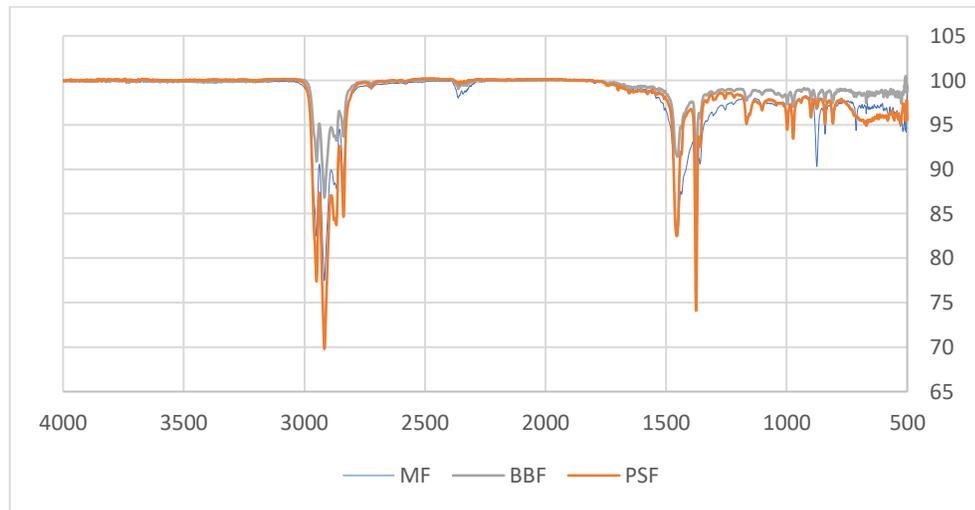


Figura 4.1 Espectro FTIR-ATR de las fibras MF, BBF y PSF

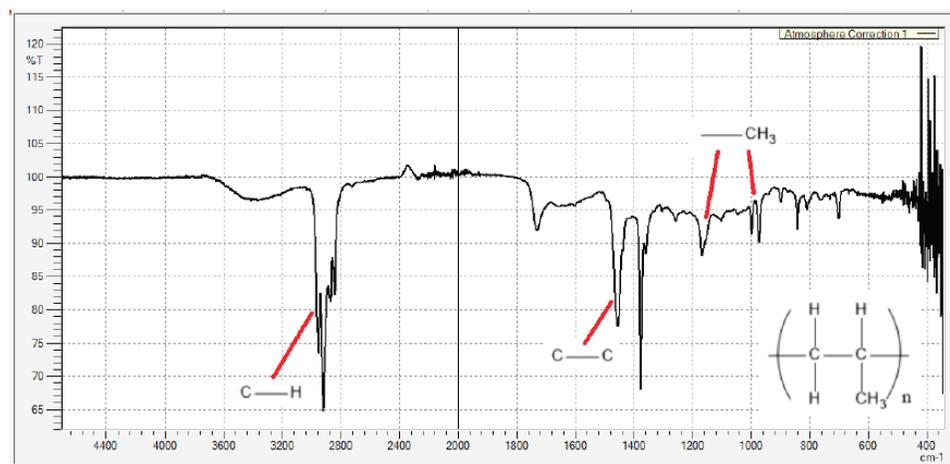


Figura 4.2 Espectro FTIR-ATR del polipropileno

Fuente: Velandia (2017)

A partir de los resultados presentados en las Figuras 4.1 y 4.2, se aprecia y analiza una significativa correlación entre los espectros de MF, BBF y PSF con el espectro del material de polipropileno. Este análisis respalda que los materiales reciclados en estudio coinciden con el material de las fibras empleadas de manera habitual en el refuerzo de hormigones, es decir, el polipropileno.

4.2.2 Caracterización mecánica de las fibras recicladas

Los resultados obtenidos a partir del ensayo a tracción a las fibras recicladas se observan en la Tabla 4.1. El detalle de los resultados de cada prueba se presenta en el Anexo 4.1 en la Tabla A.4.1.

Tabla 4.1 Propiedades mecánicas de las fibras recicladas de polipropileno

| Propiedad | MF | BBF | PSF |
|---------------------------------|------|-------|-------|
| Resistencia a la tracción (MPa) | 6,2 | 189,3 | 284,0 |
| Módulo de elasticidad (MPa) | 78 | 3951 | 3600 |
| Alargamiento (%) | 65,2 | 10,2 | 22,0 |
| Fuerza de rotura (N) | 14,9 | 18,7 | 227,2 |

Los resultados indican que las fibras obtenidas a partir de tiras de embalaje exhiben las propiedades mecánicas más destacadas en comparación con las fibras MF y BBF. En particular, las fibras MF muestran una resistencia a la tracción significativamente inferior en comparación con las BBF y las PSF.

Al contrastar las propiedades de las fibras recicladas utilizadas con fibras comerciales, como SikaFiber Force PP-48, se observa que estas últimas presentan una resistencia a la tracción superior a 550 MPa. Este hallazgo demuestra que las fibras comerciales exhiben propiedades mecánicas superiores en comparación con las fibras recicladas derivadas de diversos materiales de polipropileno.

4.3 Serie 1

En el análisis para obtener fibras a partir de mascarillas, se tomó de referencia la investigación de González (2023), la cual concluyó en su estudio de adición de respiradores KN95 a hormigones porosos que era necesario incorporar fibras de

mayor tamaño a las que utilizó (5 a 15 mm) para lograr una mejor adherencia a la mezcla y generar un efecto puente, mejorando así las propiedades mecánicas del hormigón poroso. Siguiendo este enfoque, se optó por utilizar un equipo triturador que permitiera obtener fibras de dimensiones mayores (30 a 45 mm).

Los resultados de las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso con adición de fibras recicladas de mascarillas se presentan en la Figura 4.3. Detalles adicionales sobre los resultados por probeta se encuentran en el Anexo 4.1, en las Tablas A.4.2, A.4.3 y A.4.4.

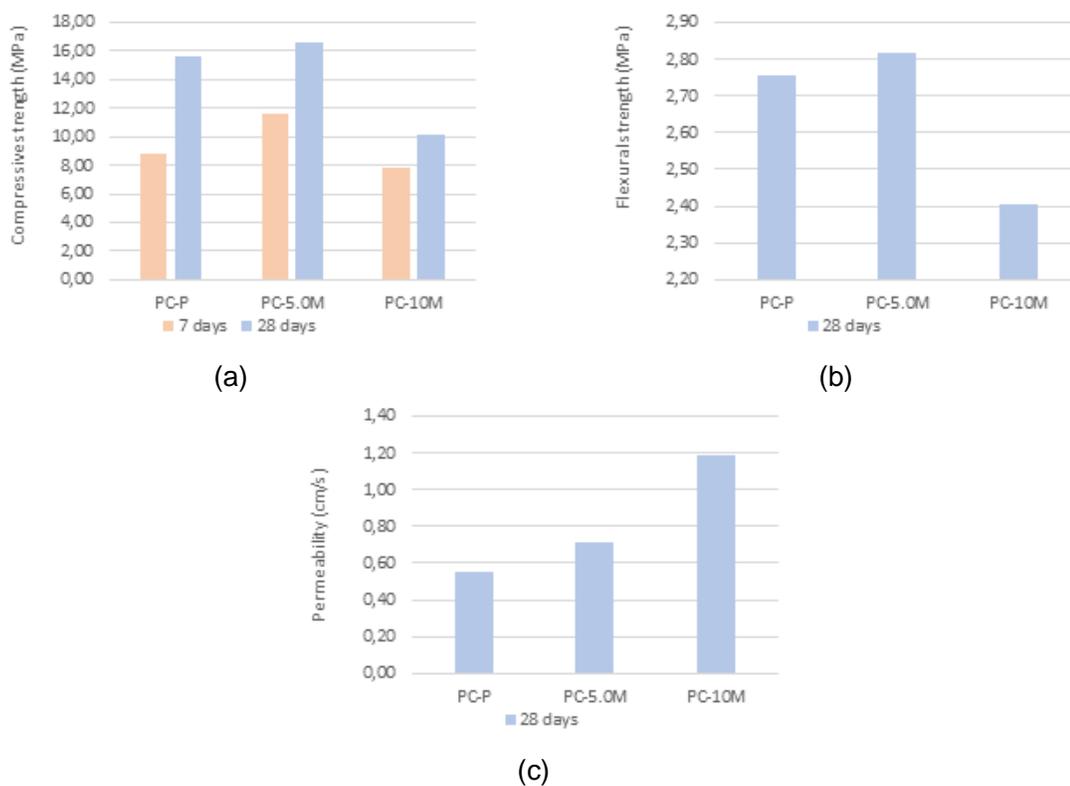


Figura 4.3 Propiedades mecánicas e hidráulicas de la incorporación de fibras de mascarillas a hormigones porosos. (a) Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. (b) Resistencia a la flexión a los 28 días. (c) permeabilidad a los 28 días.

Los resultados evidencian que la mezcla PC-5.0M mejora la resistencia a la compresión en un 32% a los 7 días y en 6% a los 28 días con respecto a la mezcla patrón. Sin embargo, al incrementar el porcentaje de adición de fibra a 0,1%, la resistencia disminuye en 11% y 36% a los 7 y 28 días, respectivamente. Este fenómeno coincide con lo observado por González (2023), quien encontró que con una adición de fibra del 0,10%, la resistencia a la compresión aumentó en un 38% y un 3% a los 7 y 28 días, respectivamente, pero disminuyó con 0,15% y 0,20% de adición de fibra. Resultados similares fueron obtenidos por Reyes y Torres (2002) y Elavarasan *et al.* (2022), quienes trabajaron con hormigones porosos con adición de fibras recicladas de bolsas plásticas y de polipropileno virgen, respectivamente. Observaron un aumento en la resistencia a la compresión hasta cierto porcentaje de adición de fibra, seguido de una disminución.

En relación con la resistencia a la flexotracción a los 28 días, se registra un comportamiento similar al observado en la resistencia a la compresión. La incorporación del 0,05% de MF resulta en un incremento del 2%, mientras que la adición del 0,1% de MF conlleva una reducción del 11%. Rehder *et al.* (2014) obtuvieron resultados análogos al incorporar un 0,5% de fibra de polipropileno en hormigones porosos, observando un leve aumento, pero al incrementar la cantidad de fibra al 1,0%, se experimentó una disminución en la resistencia a la flexión. Por el contrario, Chavan *et al.* (2019) presentó mejores resultados, pues con 0,2%, 0,4% y 0,6% de fibras de polipropileno, la resistencia a la flexión aumentó progresivamente. Este fenómeno podría atribuirse al uso de un aditivo superplastificante que mejora la distribución y adherencia de las fibras a la matriz cementicia del hormigón. Además, el empleo de fibras de polipropileno virgen, con una resistencia a la tracción significativamente mayor que las fibras recicladas, podría explicar estos resultados, corroborando hallazgos similares en

Aliabdo et al. (2018), donde la resistencia aumenta de manera gradual con la adición del 0,1% y 0,2% de fibras comerciales de polipropileno.

La Figura 4.3 (c) presenta los resultados del coeficiente de permeabilidad de las mezclas estudiadas. PC-P muestra una permeabilidad de 0,56 cm/s. En las mezclas con adición de fibras, se observa que a medida que aumenta el porcentaje de adición de MF, la permeabilidad también aumenta, registrándose valores de 0,71 cm/s y 1,18 cm/s para PC-5.0M y PC-10M, respectivamente. Los valores de permeabilidad se encuentran en el rango establecido por el comité 522 del ACI (2010) de 0,14 a 1,22 cm/s. El comportamiento de aumento de permeabilidad al adicionar fibra en hormigones porosos también se reflejó en González (2023) y Aliabdo *et al* (2018). El incremento ascendente en la permeabilidad de estas mezclas de hormigón se atribuye al aumento del contenido de fibras. Este aumento conlleva a una mayor retención de aire dentro de la mezcla, lo que a su vez promueve la formación de poros en el hormigón., mejorando significativamente la capacidad de drenaje y la permeabilidad del pavimento.

La reducción de las propiedades mecánicas al aumentar la dosis de adición de fibras a las mezclas de hormigón poroso puede explicarse por diversos factores. Al incorporar una mayor cantidad de fibras, estas tienden a dificultar su dispersión dentro de la matriz, lo que resulta en su acumulación y la formación de zonas de transición interfacial débiles, así como en posibles fallas internas. Estos fenómenos debilitan la capacidad de refuerzo de las fibras en la estructura del hormigón. Además, dosis más altas de adición de fibra pueden provocar la pérdida de fluidez. en la mezcla, generando una composición difícil de manipular y compactar. Una compactación inadecuada conlleva una disminución en la resistencia final del hormigón.

De los resultados obtenidos en esta serie, como la mezcla PC-5.0M obtuvo una mejora en las propiedades mecánicas e hidráulicas se decide trabajar con esta mezcla para la elaboración de una losa de la sección de pavimento.

4.4 Serie 2

Esta etapa de la investigación se enfocó en la evaluación preliminar de la viabilidad de integrar otros tipos de materiales reciclados de polipropileno en la elaboración de hormigones porosos, centrándose en la evaluación de la resistencia a flexotracción a los 7 días. Se utilizaron fibras procedentes de maxisacos y tiras de embalaje ya desechados. Inicialmente se examinó la incorporación de BBF y PSF. Posteriormente, en base a los resultados obtenidos, se decide combinar las fibras utilizadas, teniendo en consideración la incorporación de fibras de mascarillas.

4.4.1 Evaluación de mezclas porosas con FBB y PSF

Los resultados de la resistencia a la flexotracción a los 7 días de las mezclas estudiadas con los distintos porcentajes de adición fibras FBB y PSF en hormigones porosos y su comparación con respecto a la mezcla patrón se visualizan en la figura

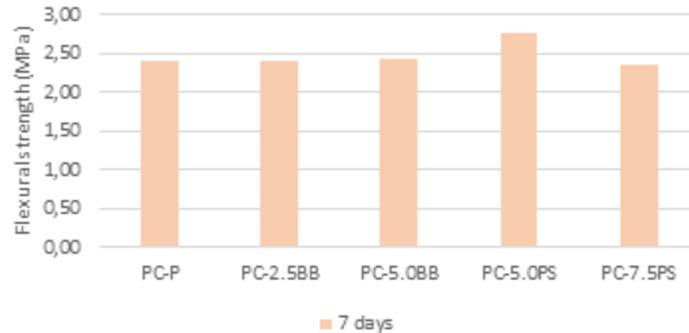


Figura 4.4 Resistencia a la flexión de las mezclas de hormigón poroso con adición de BBF y PSF.

En comparación con la mezcla de referencia PC-P, en el caso de las mezclas con BBF, se observa una disminución del 0,4% en la resistencia con una adición del 0,025%. Sin embargo, con un aumento en la adición al 0,05%, se registra un incremento del 0,6% en la resistencia. En contraste, en las mezclas con PSF, se evidencia un aumento del 14,2% en la resistencia con una adición del 0,05% de fibra. Es importante destacar que este efecto positivo disminuye al aumentar la adición de PSF al 0,075%, momento en el que se observa una disminución del 3% en la resistencia.

4.4.2 Evaluación combinación de fibras

De los resultados obtenidos en el primer análisis de la serie 2 y también teniendo en consideración el uso de fibras recicladas de mascarillas, se continua con la evaluación preliminar de la combinación de fibras. Para las mezclas de hormigón poroso se decide trabajar con 0,05% de adición de fibras combinadas. Dado que las fibras de tiras de embalaje demostraron un mejor rendimiento en la resistencia a flexotracción, se decidió combinar esta variante tanto con MF como con BBF, además se tuvo en consideración de añadir en mayor cantidad PSF en relación con MF Y FBB como se muestra en la Tabla 4.2. Los resultados de resistencia a

flexotracción a los 7 días obtenidos de estas mezclas se muestran en la Figura 4.5.

Tabla 4.2 Porcentajes de adición de fibras en mezclas de PC con combinación de fibras

| Mezcla | % PSF | %MF | %BBF |
|---------|-------|-------|-------|
| PC-MPS | 0,035 | 0,015 | - |
| PC-BBPS | 0,035 | - | 0,015 |

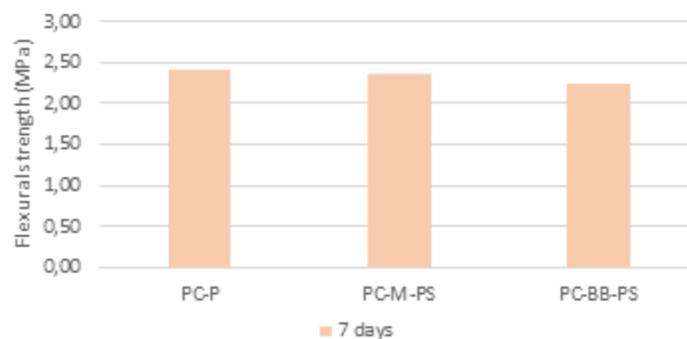


Figura 4.5 Resistencia a la flexión de las mezclas de hormigón poroso con combinación de fibras MF, BBF y PSF.

De la figura se observa que se presenta una disminución de la resistencia a flexotracción a los 7 días de las mezclas con combinación de fibras. La disminución fue de 2,1% y 6,9% para PC-MPS y PC-BBPS, respectivamente.

Los resultados obtenidos en la presente serie han orientado la selección de mezclas para las siguientes etapas. En la serie 3, se ha decidido trabajar con las mezclas PC-5.0BB, PC-5.0PS y PC-MPS, debido a que han demostrado ofrecer los mejores resultados en términos de resistencia a la flexión. Para las series 4,5 y 6, se toma la decisión de trabajar específicamente con las mezclas PC-5.0BB

y PC-5.0Z. Estas elecciones se fundamentan en su demostrada mejora en la resistencia a la flexotracción en comparación con las demás mezclas evaluadas.

4.5 Serie 3

En esta etapa se evalúa en mayor profundización las mezclas PC-5.0BB, PC-5.0PS y PC-MPS en cuanto a las propiedades mecánica e hidráulicas. En la Figura 4.6 se muestran los resultados de resistencia a compresión flexotracción y permeabilidad.

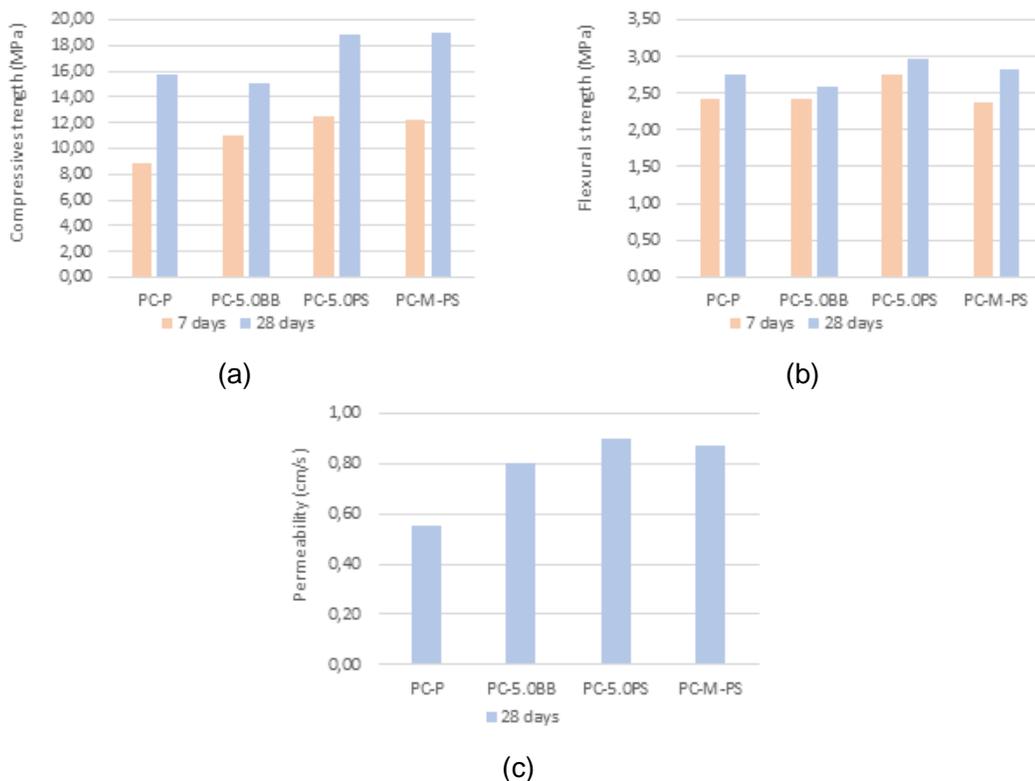


Figura 4.6 Propiedades mecánicas e hidráulicas de la incorporación de BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF a hormigones porosos. (a) Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. (b) Resistencia a la flexión a los 28 días. (c) permeabilidad a los 28 días.

Los resultados de resistencia a compresión, presentados en la Figura 4.6 (a), muestran incrementos significativos en comparación con la mezcla patrón. Concretamente, se registran aumentos del 25%, 42% y 38% para las mezclas PC-5.0BB, PC-5.0PS y PC-MPS, respectivamente. En el seguimiento a los 28 días de edad, se observa una variación en el comportamiento de las mezclas. Pues, en comparación con la mezcla patrón PC-5.0BB experimenta una disminución del 4%, mientras que las mezclas PC-5.0PS y PC-MPS experimentaron incrementos del 20% y 21%, respectivamente. Este hallazgo propone una rápida generación de resistencia a los 7 días, seguido de una desaceleración en la tasa de reacción con el tiempo.

En cuanto a la resistencia a la flexión a los 28 días, se observa un patrón de comportamiento similar al registrado en las mezclas evaluadas de resistencia a compresión durante el mismo periodo. En ese sentido, la mezcla PC-5.0BB exhibe una disminución del 6%, mientras que las mezclas PC-5.0PS y PC-MPS presentan incrementos del 8% y 3%, respectivamente.

Los resultados de permeabilidad a los 28 días del hormigón poroso con adición de fibras recicladas de maxisacos, tiras de embalaje y la combinación de PSF con MF, observados en la Figura 4.6 (c), reflejan un comportamiento similar al del hormigón poroso con adición de MF. Esto se debe al incremento del coeficiente de permeabilidad de las mezclas con la incorporación de fibras, entregando valores de 0,80 cm/s, 0,90 cm/s y 0,87 cm/s para las mezclas PC-5.0BB, PC-5.0PS y PC-MPS, respectivamente.

La mejora de las propiedades mecánicas de la mezcla PC-5.0PS coinciden con los resultados obtenidos Hesami *et al.* (2014) donde evalúan el uso de fibras de polipropileno comerciales en hormigones porosos, utilizando fibras de longitud de 50 mm donde al utilizar una adición del 0,3% obtiene aumentos del 30% y 17%

en la resistencia a la compresión y flexión, respectivamente. Asimismo, Pils *et al.* (2019) y Rehder *et al.* (2014) con fibras de la misma longitud también presentan mejoras en la resistencia a la flexión.

El mejor rendimiento observado en las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso, gracias a la inclusión de fibras recicladas, se fundamentan en el papel esencial que desempeñan estas fibras al detener la generación inicial de grietas y aumentar la energía requerida para la propagación de estas, lo que resulta en un incremento significativo en la resistencia a la flexión (Akand *et al.*, 2019). En esta misma línea, Rehder *et al.* (2014) sostienen que las fibras facilitan la conexión entre poros, transfiriendo cargas a través de la estructura del hormigón y mejorando su rendimiento en términos de resistencia. De manera complementaria, Hannawi *et al.* (2016) destacan que el aumento en la interconexión entre poros conlleva a un incremento en la permeabilidad del hormigón. Además, al incorporar fibras a la matriz cementicia, estas alteran el esqueleto granular, reacomodándolo y creando espacios vacíos en el hormigón (Meddah y Bencheikh, 2009).

4.6 Comparación mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS

Se realiza un análisis y comparación de las mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS, los resultados se visualizan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas e hidráulicas mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS

| | Compressive strength (MPa) | Flexural strength (MPa) | Permeability (cm/s) |
|----------|----------------------------|-------------------------|---------------------|
| PC-P | 15,67 | 2,76 | 0,56 |
| PC-5.0M | 16,56 | 2,82 | 0,71 |
| PC-5.0BB | 15,05 | 2,59 | 0,80 |
| PC-5.0PS | 18,85 | 2,98 | 0,90 |

Los resultados revelan diferencias significativas en la eficacia de diversas fibras recicladas empleadas. Las fibras de mayor longitud, como las PSF y MF en contraste con las FBB, demuestran mejoras sustanciales en la resistencia del hormigón poroso. Esta observación está respaldada por investigaciones anteriores. Reyes *et al.* (2002) examinaron la inclusión de fibras de distintos tamaños de bolsas plásticas en hormigones porosos, concluyendo que las fibras más largas ofrecen mejores niveles de resistencia a compresión y flexión a los 7 días de fraguado del hormigón, en comparación con las fibras más cortas. Estos hallazgos se explican por lo establecido en varios estudios (Pujadas, 2008; Fallah y Nematzadeh, 2017; Jiang *et al.*, 2014; Bagherzadeh *et al.*, 2011), los cuales sugieren que las fibras más largas establecen un efecto de puente y anclaje más sólido dentro de la matriz de hormigón. En contraste, las fibras de menor longitud evidencian una adherencia débil, lo que favorece su extracción al aplicar cargas de flexión al hormigón. De igual manera, la relación de aspecto de la fibra (que se calcula dividiendo su longitud por su ancho) afecta cómo se comportará la fibra dentro del hormigón cemento. Cuando la relación de aspecto es mayor, significa que hay más fibras en un espacio determinado del hormigón. Esto conduce a una conexión más sólida entre las fibras, creando un efecto de puente más robusto y, en consecuencia, mejorando las propiedades mecánicas del hormigón.

El anclaje de las fibras en la matriz del hormigón también está influenciado por el tamaño del árido grueso. Pils *et al* (2019), Bright y Murugan (2020) y Joung y Grasley (2008) en sus investigaciones analizaron distintos tamaños de áridos gruesos y cómo influye la inclusión de fibras en hormigones porosos. Concluyeron que áridos de tamaño más pequeño presentan mejores resultados al incorporar fibras, ya que las fibras con longitud mayor que el tamaño máximo del agregado tienen la capacidad de 'tejer' la estructura después del inicio del agrietamiento durante la aplicación de cargas de flexión.

El diagrama de Figura 4.7 muestra los diferentes modos de falla asociados con el hormigón reforzado con fibras (yin *et al.*, 2015), ruptura de la fibra (1), extracción de la fibra (2), efecto puente (3), desunión entre la fibra y la matriz (4) y prevención del agrietamiento (5).

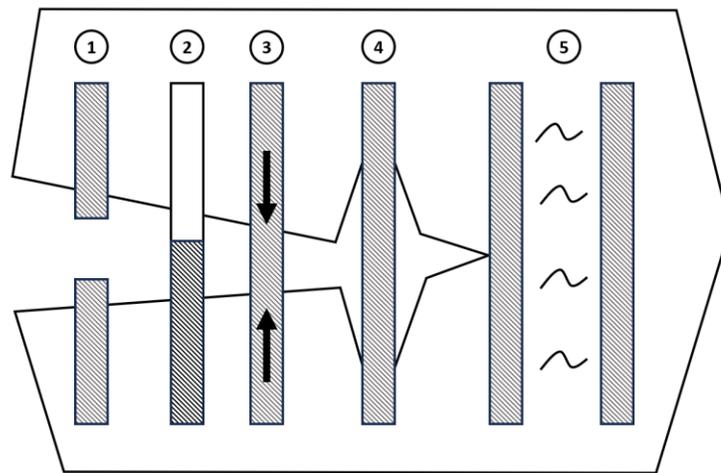


Figura 4.7 Modos de falla hormigón reforzado con fibras

Fuente: Yin et al. (2015)

Estos modos de falla se pueden observar en las distintas fibras utilizadas en la presente investigación. Como se visualiza en la Figura 4.8 (a), las probetas con fibra MF al momento de alcanzar la ruptura éstas no son capaces de seguir resistiendo las sollicitaciones y se rompen, esto es debido a su baja resistencia a la tracción en comparación con las demás fibras. La extracción de la fibra ocurre en el caso de las fibras de maxisacos Figura 4.8 (b), debido a su corta longitud, pues las fibras de polipropileno son hidrofóbicas, lo que significa que al entrar en contacto con la matriz cementicia, que es hidrofílica, no se genera afinidad química entre ellos. Esta falta de afinidad conduce a una unión deficiente entre la fibra y la matriz, lo que resulta en un efecto de refuerzo insuficiente en el hormigón, afectando negativamente sus propiedades mecánicas. Por lo tanto, para lograr un anclaje sólido, es necesario que su longitud sea mayor para así

generar un efecto puente como se visualiza con las fibras PSF en la Figura 4.8 (c). Además de su longitud, su alta resistencia a la tracción le permite resistir de mejor manera las cargas a flexión.

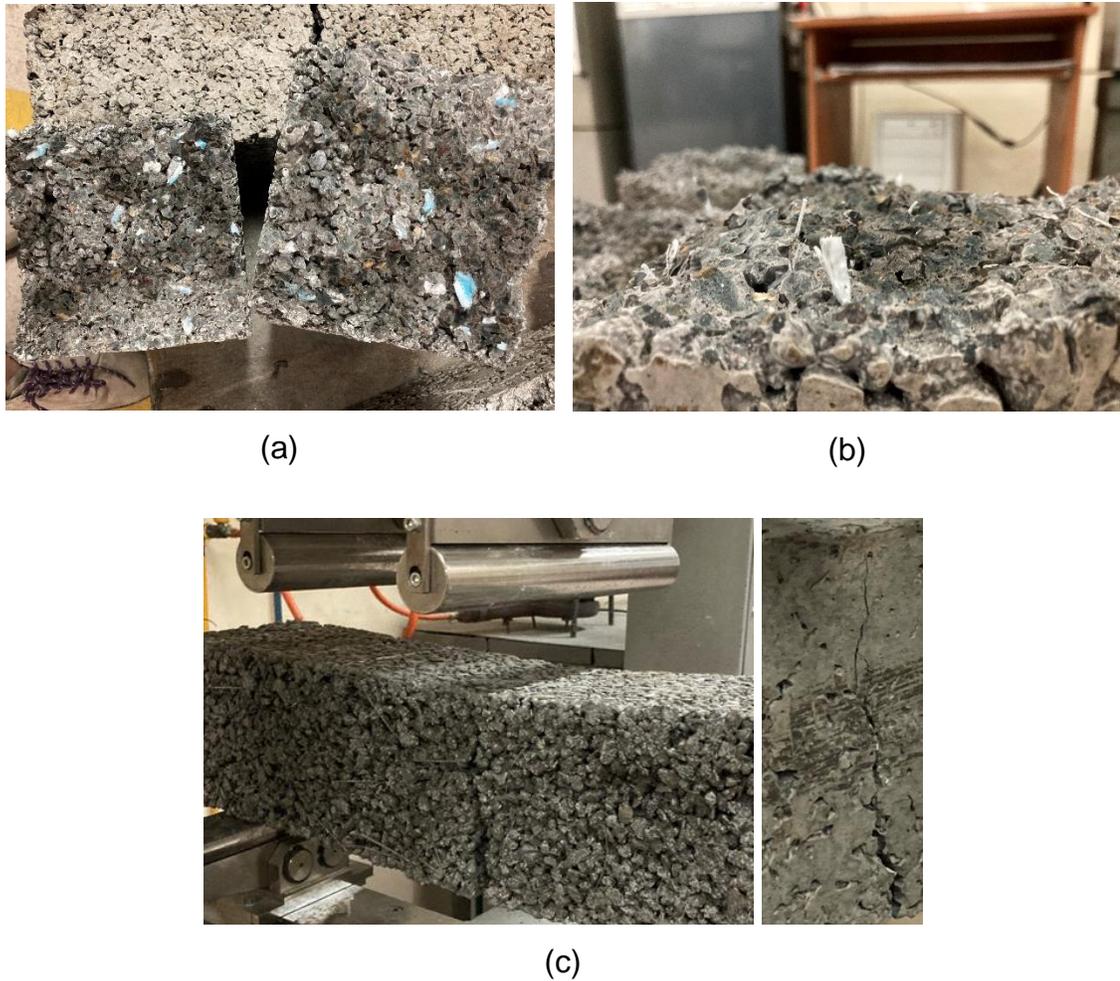


Figura 4.8 Modos de falla probetas sometidas a flexión. (a) Probeta de la mezcla PC-5.0M. (b) Probeta de la mezcla PC-5.0BB. (c) Probeta de la mezcla PC-5.0PS

4.7 Serie 4

Como las mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0Z se utilizarán para la construcción de losas para sección de pavimento, es necesario complementar la caracterización con pruebas de resistencia a la abrasión y compararlas con la mezcla patrón.

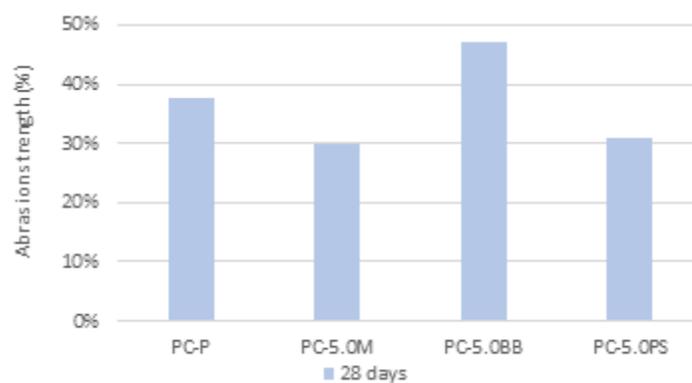


Figura 4.9 Resistencia a la abrasión de las mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS

Los resultados de pérdida de masa muestran valores del 38%, 30%, 47% y 31% para las mezclas PC-P, PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS, respectivamente. La representación gráfica de estas pérdidas en las distintas mezclas se encuentra en la Figura 4.9. Se observa una mejora considerable en la resistencia a la abrasión del hormigón poroso al introducir fibras provenientes de mascarillas y zunchos, en contraste con la mezcla estándar. Sin embargo, la mezcla con fibras de maxisacos exhibe un desgaste mayor. Esta mejora en la resistencia concuerda con hallazgos previos de Aliabdo *et al.* (2018) y Wu *et al.* (2010), quienes evidenciaron mejoras significativas al añadir fibras de polipropileno al hormigón poroso.

Es esencial señalar que el método de pérdida de masa de Cantabro, empleado por Dong *et al.* (2012), somete las probetas a 300 revoluciones. Sus

investigaciones revelaron desgaste en mezclas de hormigón poroso con adición de fibra en un rango del 40% al 80%. En contraposición, en esta investigación se utilizó el método C1798, sometiendo las probetas a 500 revoluciones. Este protocolo reveló valores de desgaste menores lo que denota una mejora más significativa en las mezclas estudiadas, evidenciando una mayor resistencia a la abrasión con un mayor número de revoluciones. La evaluación de la resistencia a la abrasión es de importancia en la investigación de este tipo de hormigones, ya que sirve como indicador de la capacidad de la superficie del pavimento para resistir el desgaste provocado por el tráfico peatonal y vehicular. Los resultados revelan que las mezclas que incluyen fibras PSF y MF contribuyen significativamente a mejorar la durabilidad del hormigón poroso convencional. Estas mejoras son evidentes en la reducción del desprendimiento, un fenómeno que constituye un fallo común en los pavimentos de hormigón permeable.

4.8 Serie 5

La microestructura de las mezclas PC-P, PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS, se muestran en las Figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13, respectivamente.

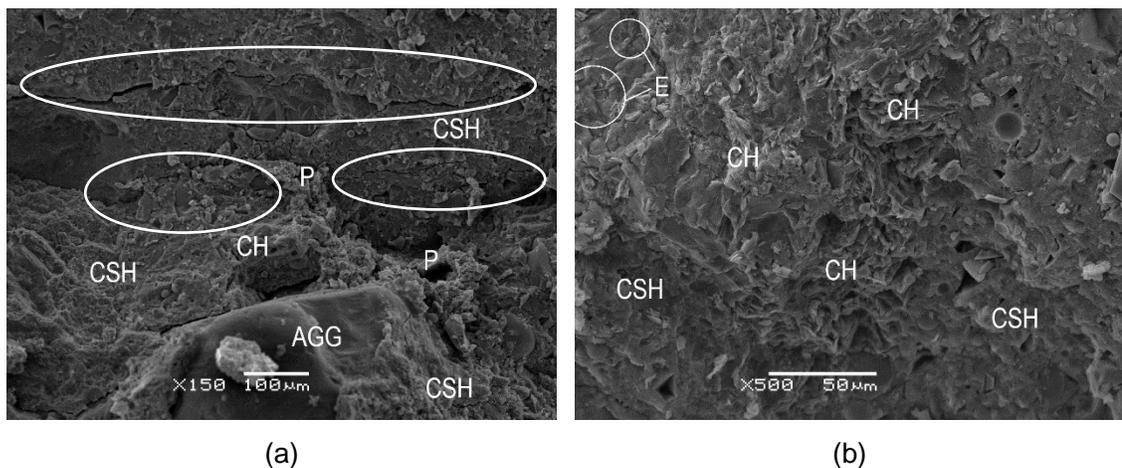


Figura 4.10 Micrografías SEM de la mezcla PC-P

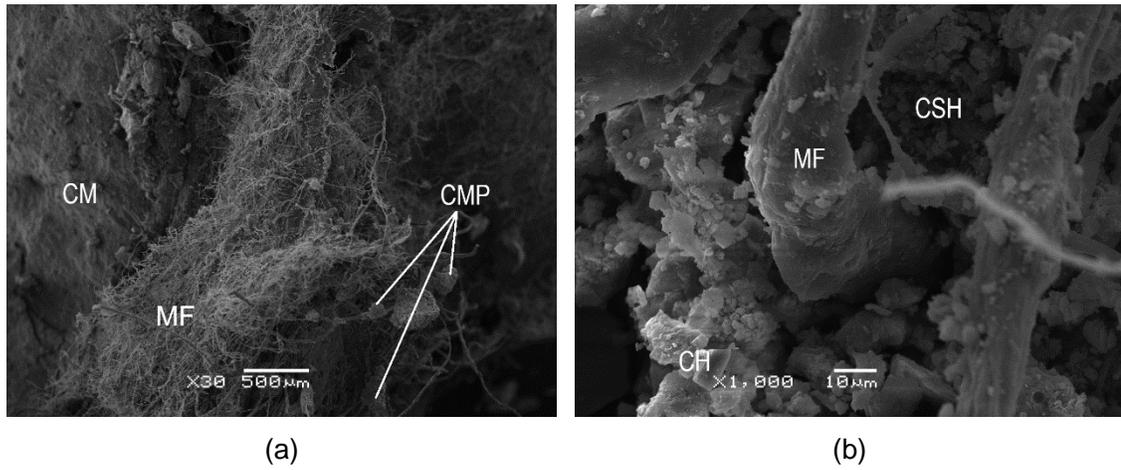


Figura 4.11 Microfrías SEM de la mezcla PC-5.0M

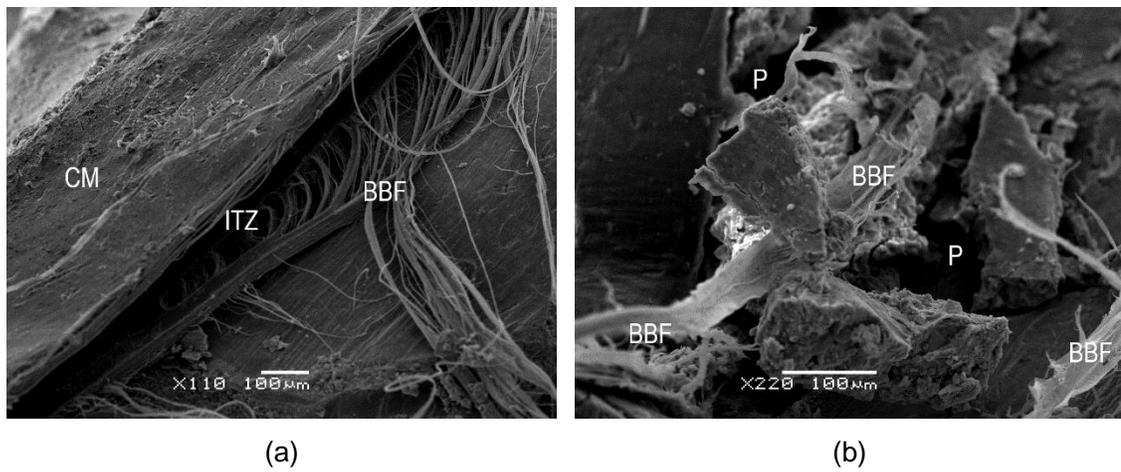


Figura 4.12 Microfrías SEM de la mezcla PC-5.0BB

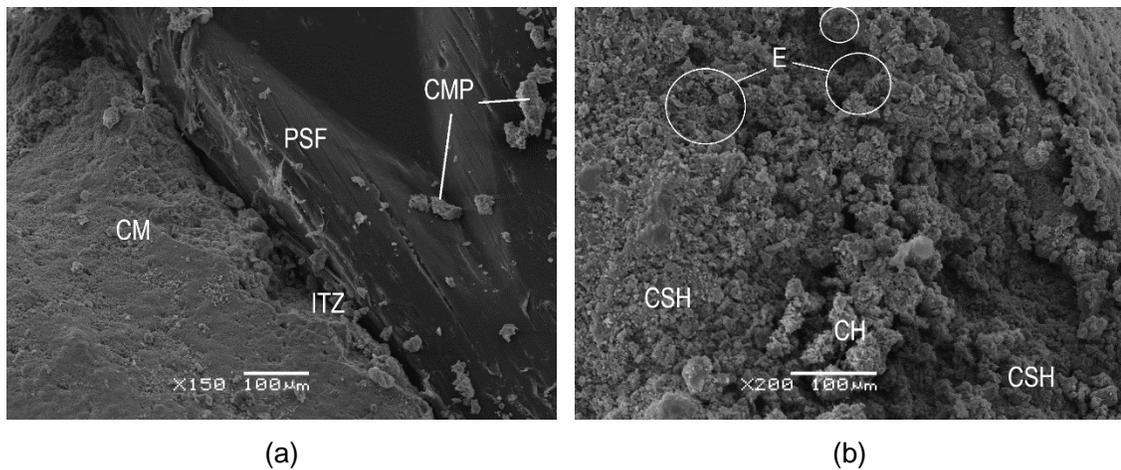


Figura 4.13 Microfrías SEM de la mezcla PC-5.0PS

El análisis microestructural del hormigón poroso patrón revela los componentes generados durante la formación de la matriz cementante, como el hidróxido de calcio (CH), el gel de silicato de calcio hidratado (CSH) y las etringitas. En la Figura 4.10 (a), se visualiza la formación de microgrietas, una característica ausente al observar la microestructura de las mezclas con adición de fibras. Esto sugiere que la incorporación de fibras previene el fenómeno de microagrietamiento en el hormigón.

En las micrografías de la mezcla con fibras de mascarillas, se evidencia la rotura de la fibra y su adherencia a la matriz cementicia. Además, se observa la formación de poros alrededor de la fibra debido a la naturaleza hidrofóbica de la misma, alterando la estructura porosa del hormigón, justificando así el aumento de la permeabilidad en el hormigón. A través de las micrografías de mezclas con BBF, se justifica su bajo rendimiento mecánico, ya que se aprecia la mala calidad de la zona de interacción interfacial (ITZ) entre las fibras y la matriz cementante, evidenciando el desprendimiento de la fibra de la matriz Figura 4.12 (a). Además, se observa una estructura alterada en el hormigón, con una mayor presencia de poros y una débil unión entre sus componentes, en comparación con las imágenes de la mezcla PC-P, donde se aprecia una estructura más densa y menos porosa.

Las mezclas con PSF (Figura 4.13), destacan una mejor adherencia con la matriz cementicia en comparación con la fibra BBF, asimismo se observan piezas o fragmentos de matriz cementicia (CMP) adheridos a la fibra, lo que genera un entrelazamiento físico entre las interfases y crean puentes de fibras dentro del hormigón poroso, mejorando así su resistencia y ductilidad. En las Figuras 4.11 (b) y 4.13 (b) se evidencia la formación de gel CSH, compuesto responsable de las propiedades resistencias del hormigón, lo que indica que la matriz cementicia

no tuvo problemas en su formación e hidratación. Así se justifica los beneficios que tuvo la incorporación de PSF y MF a hormigones porosos.

4.9 Serie 6

En esta etapa se llevó a cabo la construcción de la sección de prueba, donde fueron escogidas las mezclas PC-C, PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS, pues fueron las que entregaron mejores resultados en el análisis de la serie 1 y 2. Para esta sección la nomenclatura utilizada para las losas es de S-PC-P, S-PC-PS, S-PC-BB y S-PC-M.

Para medir permeabilidad e infiltración en la sección de pavimento, se tomaron mediciones en tres puntos distintos por cada losa y cada medición se repitió 3 veces. Los puntos de medición se pueden visualizar en la Figura 4.14 y los resultados obtenidos en la Tabla 4.4 y en la Figura 4.15.

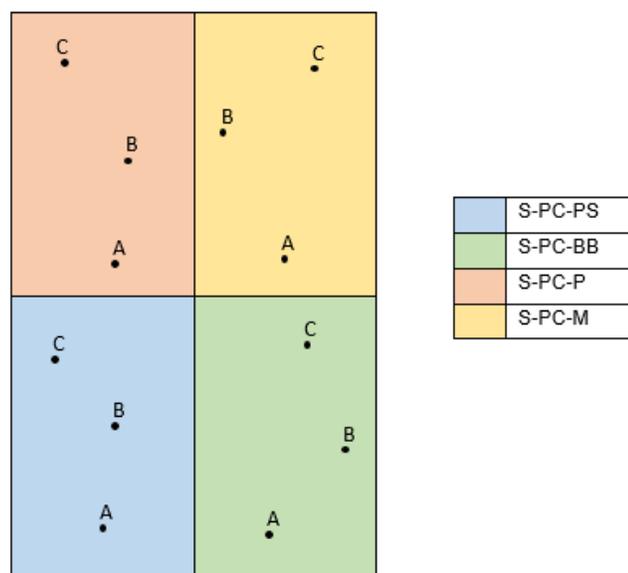


Figura 4.14 Representación de los puntos de medición de la sección de pavimento

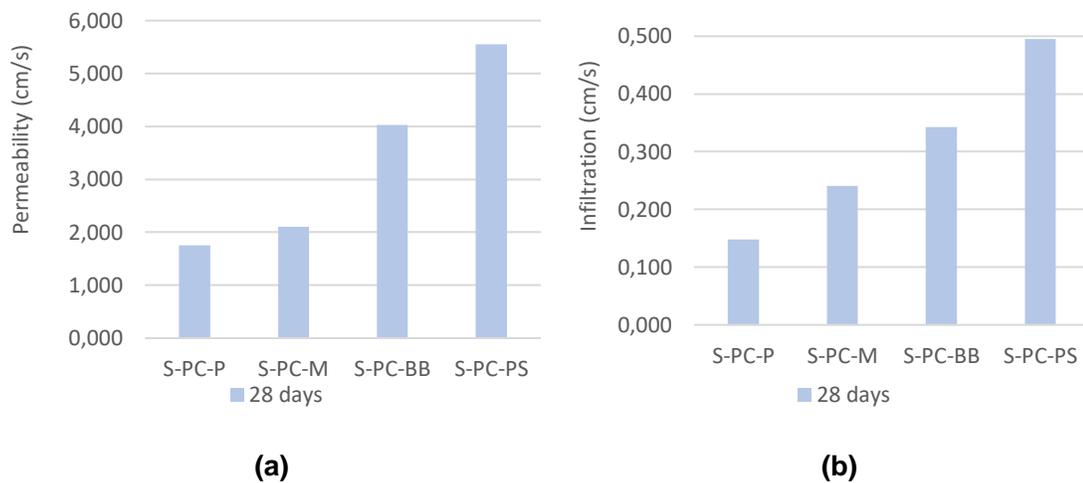


Figura 4.15 Propiedades hidráulicas de la sección de pavimento. (a) Permeabilidad; (b) Infiltración

Tabla 4.4 Propiedades hidráulicas en distintos puntos de medición del pavimento

| Losa | Punto de medición | Infiltración (cm/s) | Permeabilidad (cm/s) |
|---------|-------------------|---------------------|----------------------|
| S-PC-P | A | 0,085 | 2,32 |
| | B | 0,301 | 1,47 |
| | C | 0,059 | 1,47 |
| S-PC-PS | A | 0,079 | 3,06 |
| | B | 1,008 | 8,32 |
| | C | 0,398 | 5,26 |
| S-PC-BB | A | 0,074 | 2,59 |
| | B | 0,491 | 4,76 |
| | C | 0,463 | 4,73 |
| S-PC-M | A | 0,057 | 0,79 |
| | B | 0,318 | 2,36 |
| | C | 0,348 | 3,15 |

Se puede observar en la Figura 4.15 la notable influencia de las fibras en las propiedades hidráulicas de un pavimento de hormigón porosos. Las losas S-PC-P, S-PC-M, S-PC-BB y S-PC-PS registraron valores de 0,148 cm/s, 0,241 cm/s, 0,343 cm/s, 0,495 cm/s respectivamente en infiltración, y 1,754 cm/s, 2,102 cm/s, 4,027 cm/s, 5,548 cm/s respectivamente en permeabilidad. En los resultados obtenidos en laboratorio, se ve un comportamiento similar. Las fibras de mascarillas evidenciaron el menor aumento en permeabilidad, seguidas por las fibras de maxi sacos, mientras que las tiras de embalaje ampliaron aún más las propiedades hidráulicas. Por lo tanto, se comprueba la mejora sustancial de las propiedades hidráulicas al incorporar fibras en los pavimentos de hormigón poroso. Reyes *et al* (2002) visualizó este mismo comportamiento en pavimentos de hormigón poroso con adición de tiras plásticas donde las losas con incorporación de fibras aumentan la permeabilidad del hormigón poroso.

A pesar de este similar comportamiento se observa una gran diferencia entre los valores de permeabilidad medidos en laboratorio y los de campo, esto también se evidencia en la investigación de Ferrada (2023). Mallick *et al* (1999) Gogulo *et al*. (2003) explican que esta mayor permeabilidad se debe a que en las pruebas de laboratorio las condiciones de medición son controladas, la probeta de sella lateralmente para que el flujo del agua se restrinja en una sola dirección. en cambio, en las mediciones in situ el agua al ingresar al pavimento fluye en cualquier dirección, aumentando el flujo del agua en el pavimento. es por esto que los valores in situ son más alto que los valores de permeabilidad en laboratorio.

Comparando los valores obtenidos por el permeámetro NCAT y el anillo de infiltración, se observa que los valores de permeabilidad con el método NCAT son mucho mayores que los obtenidos por el método ASTM C1701, independiente del tipo de pavimento y la ubicación. La variabilidad de las mediciones radica en tipo de carga y en el diámetro del instrumento de medición. Li *et al* (2013) indican

que un tamaño del diámetro del instrumento más grande cubre una mayor superficie del pavimento y se reduce el movimiento del flujo lateral y hace que se produzca un flujo más cercano a unidimensional.

4.10 Conclusión

En conclusión, los resultados obtenidos en la evaluación de hormigón poroso con adición de fibras recicladas de mascarillas, maxisacos y tiras de embalaje revelan un comportamiento interesante. La mezcla PC-5.0M demostró mejoras notables en resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, pero se evidenció una disminución al incrementar el porcentaje de adición de fibra. Por otro lado, la Serie 2 exploró la viabilidad de integrar otros tipos de materiales reciclados de polipropileno, destacando el rendimiento óptimo de las fibras de zunchos en la resistencia a la flexotracción.

Estos hallazgos respaldan la selección de mezclas para las siguientes etapas de la investigación. La Serie 3 profundizó en las propiedades mecánicas e hidráulicas de las mezclas PC-5.0BB, PC-5.0Z y PC-MZ, destacando incrementos significativos en resistencia a la compresión y flexotracción. Además, se observó una mejora en la permeabilidad, respaldando la utilidad de las fibras recicladas.

La Serie 4 abordó la resistencia a la abrasión, revelando una mejora considerable en las mezclas con fibras de mascarillas y zunchos en comparación con la mezcla patrón. La Serie 5 permitió entender y justificar el comportamiento de las fibras en el hormigón porosos a través del análisis microestructural. Por último, la serie 6 llevó la investigación al campo, demostrando la influencia positiva de las fibras en las propiedades hidráulicas de los pavimentos de hormigón poroso.

En conjunto, estos resultados respaldan la viabilidad y eficacia de la incorporación de fibras recicladas en la mejora de las propiedades del hormigón poroso, ofreciendo perspectivas valiosas para su aplicación en pavimentos permeables

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

Los análisis de las mezclas de hormigón poroso con la inclusión de fibras recicladas de polipropileno revelan que las composiciones con un 0,05% de adición de diferentes tipos de fibra, como MF, BBF y PSF, son adecuadas para la construcción de pavimentos permeables. En particular, las mezclas PC-5.0M, PC-5.0BB y PC-5.0PS exhibieron valores de resistencia a la compresión de 16,56 MPa, 15,05 MPa y 18,85 MPa, respectivamente, junto con valores de resistencia a la flexotracción de 2,82, 2,50 y 2,98. Estos resultados muestran incrementos en comparación con la mezcla patrón, que registró valores de 15,67 MPa y 2,76 MPa en resistencia a la compresión y flexotracción, respectivamente. Aunque la mezcla PC-5.0BB refleja una disminución en resistencia con respecto a la mezcla sin fibras, su nivel aún supera el umbral mínimo requerido de 1,5 MPa en resistencia a la flexotracción para aplicaciones como estacionamientos. La inclusión de fibras recicladas ha demostrado mejorar las propiedades hidráulicas, tanto en condiciones de laboratorio como in situ del hormigón poroso, lo que resalta su viabilidad y beneficio para pavimentos permeables.

Los resultados obtenidos ratifican la estrecha relación existente entre la inclusión de fibras y la mejora sustancial de las propiedades del hormigón poroso. La utilización de la mezcla PC-5.0M demostró un incremento notable del 5,6% en la resistencia a la compresión y un aumento del 2,2% en la resistencia a la flexión en comparación con la mezcla patrón PC-C. Sin embargo, se evidenció una disminución en las resistencias al aumentar la cantidad de MF, un fenómeno respaldado por investigaciones previas documentadas. En lo que respecta a la permeabilidad, se observó un comportamiento ascendente al aumentar el contenido de MF. Las mezclas PC-5.0M y PC-10M exhibieron valores de permeabilidad de 0,71 cm/s y 1,18 cm/s, respectivamente, manteniéndose dentro de los estándares establecidos por el ACI (2010). Además, es relevante destacar

que estos valores representan un incremento notable en comparación con la mezcla PC-C, que registró una permeabilidad de 0,56 cm/s.

La evaluación detallada de las mezclas PC-5.0BB, PC-5.0PS y PC-MPS ha demostrado distintos comportamientos en términos de resistencia. En cuanto a la resistencia a la compresión se observaron incrementos significativos a los 7 días en comparación con la mezcla patrón, con aumentos del 25%, 42% y 38% para PC-5.0BB, PC-5.0PS y PC-MPS, respectivamente. Sin embargo, a los 28 días, PC-5.0BB disminuyó un 4%, mientras que PC-5.0PS y PC-MPS aumentaron un 20% y 21%, respectivamente. La rápida generación de resistencia a los 7 días seguida de una desaceleración en la tasa de reacción en el tiempo señala la necesidad de un seguimiento más prolongado para comprender completamente el comportamiento de estas mezclas. En la resistencia a la flexión a los 28 días, PC-5.0BB experimentó una disminución del 6%, mientras que PC-5.0PS y PC-MPS presentaron incrementos del 8% y 3%, respectivamente, en comparación con la mezcla patrón. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas, como Hesami *et al.* (2014), que evidencian mejoras significativas en la resistencia a la compresión y flexión al incorporar fibras de polipropileno, especialmente notables en PC-5.0PS. Las mezclas con adición de fibras recicladas mostraron incrementos en el coeficiente de permeabilidad, con valores de 0,80 cm/s, 0,90 cm/s y 0,87 cm/s para PC-5.0BB, PC-5.0PS y PC-MPS, respectivamente, a los 28 días.

La investigación destaca que las fibras recicladas de polipropileno más largas, como PSF y MF, mejoran significativamente la resistencia del hormigón poroso. Estudios anteriores respaldan este hallazgo, destacando que estas fibras largas crean un sólido anclaje en la matriz del hormigón, a diferencia de las fibras cortas, que tienden a ser menos efectivas bajo cargas de flexión. Además, se observa que el tamaño del árido grueso influye en esta interacción: fibras dos veces más

largas que el tamaño del árido grueso potencian el efecto de refuerzo de las fibras. El análisis de los modos de falla confirma estos resultados: las fibras más cortas tienden a ser extraídas, mientras que las más largas como PSF exhiben un sólido efecto puente, resistiendo mejor las cargas de flexión. Estos descubrimientos subrayan la importancia crucial de considerar la longitud y resistencia de las fibras, para mejorar las propiedades del hormigón poroso reforzado con fibras recicladas de polipropileno, abriendo oportunidades para su aplicación efectiva en distintos proyectos constructivos. Esto se evidencia con el análisis microestructural donde Las micrografías muestran resultados distintos según el tipo de fibra utilizada: mientras las fibras de mascarillas exhiben rotura y porosidad alrededor, afectando la unión con la matriz de cemento y aumentando la permeabilidad, las fibras BBF presentan una interacción deficiente con la matriz, evidenciando un desprendimiento que disminuye la resistencia y altera la estructura del hormigón. En contraste, las fibras PSF muestran una mejor adherencia, reflejada en la formación de gel CSH y etringitas, lo que justifica sus beneficios en términos de fortalecimiento de la matriz cementante en el hormigón poroso.

Los resultados obtenidos en la investigación sobre la influencia de las fibras en las propiedades hidráulicas de los pavimentos de hormigón poroso confirman una mejora sustancial en la permeabilidad al introducir fibras en las losas de hormigón. Se evidencia una clara relación entre la inclusión de distintos tipos de fibras y la variación en la capacidad de infiltración y permeabilidad del pavimento. No obstante, se debe destacar la diferencia significativa entre los valores de permeabilidad medidos en condiciones de laboratorio y en campo. La discrepancia se explica por las variaciones en las condiciones de medición, donde en laboratorio se restringe el flujo del agua en una sola dirección, mientras que en condiciones in situ, el agua fluye en múltiples direcciones, generando valores de permeabilidad más altos. Este fenómeno, respaldado por la

investigación de Ferrada (2023) y explicado por Mallick *et al.* (1999) y Gogulo *et al.* (2003), subraya la importancia de considerar las diferencias contextuales al interpretar mediciones de permeabilidad. Además, al comparar los valores obtenidos mediante el permeámetro NCAT y el anillo de infiltración, se observa una notable diferencia, independientemente del tipo de pavimento o la ubicación. La variabilidad en estas mediciones se atribuye al tipo de carga aplicada y al diámetro del instrumento de medición. Esta diferencia destaca la importancia de considerar las condiciones y el método de medición al evaluar la permeabilidad, tal como lo indican Li *et al.* (2013), enfatizando que un mayor diámetro del instrumento puede influir en la uniformidad y dirección del flujo, alterando los resultados de permeabilidad.

REFERENCIAS

- American Concrete Institute [ACI]. (2010). 522R-10. Report on Pervious Concrete. Technical Documents; American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2010.
- Alani, A. M., & Beckett, D. (2013). Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab. *Construction and Building Materials*, 41, 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.043>
- ASTM D638-14 (2019). *Standard test method for tensile properties of plastics*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- Abellán, A. (2016). Los impactos de la urbanización en el ciclo del agua. *iAgua*. <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/impactos-urbanizacion-ciclo-agua>
- Ang, J., & Lihndal, E. (2017). *Porous Concrete Design*. Santa Clara University.
- Akand, L., Yang, M., & Wang, X. (2018). Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.068>
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Fawzy, A. M. (2018). Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 193, 105–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182>

ASTM C1747-22 (2022). *Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2022.

ASTM C1701-20 (2020). *Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.

Baeza, E. (2008). *Drenaje de aguas lluvia y residuales*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Banasik, K. (2008). Flood flow consequences of land use changes in a small urban catchment of Warsaw. *11th International Conference on Urban Drainage*.

Bagherzadeh, R., Sadeghi, A.-H., & Latifi, M. (2012). Utilizing polypropylene fibers to improve physical and mechanical properties of concrete. *Textile Research Journal*, 82(1), 88–96.
<https://doi.org/10.1177/0040517511420767>

Baskar, I., Thiruvannamalai, M. y Theenathayalan, R. (2019). Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced pervious concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(2), 977-987.

Buteler, M. (2019). ¿Qué es la contaminación por plástico y por Qué nos afecta a todos? *DESDE LA PATAGONIA DIFUNDIENDO SABERES*, 16(28), 56-60.

- Bright, S. y Murugan, M. (2020). Effect of aggregate size on properties of polypropylene and glass fibre-reinforced pervious concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(6), 2034-2048.
- Brianese, A. (2021). El impacto ambiental del plástico en la naturaleza. *Vitrubio*. <https://www.ambientevitrubio.com/post/el-impacto-ambiental-del-pl%C3%A1stico-en-la-naturaleza>
- Chu, H.-J., Lin, Y.-P., Huang, C.-W., Hsu, C.-Y., & Chen, H.-Y. (2010). Modelling the hydrologic effects of dynamic land-use change using a distributed hydrologic model and a spatial land-use allocation model. *Hydrological Processes*, 24(18), 2538–2554. <https://doi.org/10.1002/hyp.7667>
- CIEL-Center for International Environmental Law. (2019). El plástico y la salud: los costos ocultos de un planeta plástico. *Center for International Environmental Law*. <https://bit.ly/3almHd6>
- Chavan, P., Patare, D. y Wagh, M. (2019). Enhancement of pervious concrete properties by using polypropylene fiber. *International Journal Of Engineering Research and General Science*. 7(6). 17-25.
- Carrasco, M. F., Rautenberg, D. P., y Positieri, M. J. (2022). Hormigón drenante: diseño, características y aplicaciones. *Revista Hormigón*, 61, 5–23.
- Da Silva, C. J., López, P. E., Federico, Y., & Arias, C. (2022). Las inundaciones en las áreas urbanas: el caso del Área Metropolitana del Gran Resistencia. *Revista de Geografía Norte Grande*, 82, 333-354.

- Diario Uchile, (2021). Las mascarillas desechables ponen en peligro a los animales. *Diario Uchile Radio Universidad de Chile*.
<https://radio.uchile.cl/2021/01/21/las-mascarillas-desechables-ponen-en-peligro-a-los-animales/>
- Eissa, A. E., & Zaki, M. M. (2011). The impact of global climatic changes on the aquatic environment. *Procedia Environmental Sciences*, 4, 251–259.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.03.030>
- Elavarasan, S., Priya, A. K., Bharath, S., Satheeshkanna, R., & Arunraj, D. (2022). Experimental studies on pervious concrete reinforced with polypropylene fiber. *Materials Today: Proceedings*, 68, 2280–2283.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.492>
- Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, 132, 170–187.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100>
- Feng, B., Zhang, Y., & Bourke, R. (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *Natural Hazards (Dordrecht, Netherlands)*, 106(1), 613–627.
<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>
- Furkan Ozel, B., Sakallı, Ş., & Şahin, Y. (2022). The effects of aggregate and fiber characteristics on the properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 356(129294).
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129294>

- Ferrada, C. (2023). *Estudio experimental de secciones de pavimento de hormigón poroso con residuos de vidrio o cerámica como reemplazo parcial de cemento*. [Tesis de Magister, Universidad de Concepción]. Repositorio Biblioteca Universidad de Concepción.
- Gogula, A., Hossain, M., Romanoschi, S., & Fager, G. A. (2003). Correlation between the laboratory and field permeability values for the superpave pavements. *The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*.
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H., & Makhloufi, A. (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). *Construction and Building Materials*, 82, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.059>
- Gallo Neto, H., Gomes Bantel, C., Browning, J., Della Fina, N., Albuquerque Ballabio, T., Teles de Santana, F., de Karam e Britto, M., & Beatriz Barbosa, C. (2021). Mortality of a juvenile Magellanic penguin (*Spheniscus magellanicus*, Spheniscidae) associated with the ingestion of a PFF-2 protective mask during the Covid-19 pandemic. *Marine Pollution Bulletin*, 166(112232), 112232. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112232>
- González, P. (2023). *Evaluación del comportamiento de hormigones porosos con adición de fibras recicladas obtenidas de respiradores KN95* [Tesis de pregrado no publicada]. Universidad de Concepción.
- Hsie, M., Tu, C., & Song, P. S. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science & Engineering. A*,

Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 494(1–2), 153–157. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.037>

Hesami, S., Ahmadi, S., & Nematzadeh, M. (2014). Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 53, 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070>

Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W. & Raghavan, B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214-220.

INN. *Cemento — Terminología, clasificación y especificaciones generales*, NCh148.1968; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 1968.

INN. *Hormigón y mortero — Agua de amasado — Clasificación y requisitos*, NCh1498.2012; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2012.

INN. *Hormigón — Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento*, NCh1017.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.

INN. *Hormigón — Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*, NCh1037.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.

INN. *Hormigón — Ensayo de tracción por flexión*, NCh1038.2009; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2009.

- INN. *Áridos para morteros y hormigones — Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas*, NCh1117.2010; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 2010.
- INN. *Áridos para morteros y hormigones — Requisitos generales*, NCh163.1979; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 1979.
- INN. *Mecánica de suelos – Determinación de la humedad*, NCh1515. 1978; Instituto Nacional de Normalización: Santiago, Chile, 1978.
- Iñiguez, M. (2019). *Estudio de la contaminación marina por plásticos y evaluación de contaminantes derivados de su tratamiento*. [Tesis Doctoral, Universidad de Alicante]. Universidad de Alicante.
- Joung, Y., & Grasley, Z. (2008). Evaluation and Optimization of Durable Pervious Concrete for Use in Urban Areas. *Southwest Region University Transportation Center Texas Transportation Institute*
- Jiang, C., Fan, K., Wu, F. & Chen, D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.056>
- Konrad, C. (2003). Effects of Urban Development on Floods. USGS-U.S. Geological Survey, Washington District. <https://pubs.usgs.gov/fs/fs07603/>
- Kubba, S. (2010). Choosing materials and products. En *Green Construction Project Management and Cost Oversight*, 221–266. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-676-7.00006-3>

- Katyal, A., & Petrisor, I. (2011). Estrategias de gestión de inundaciones para un desarrollo sostenible integral. *Forense mental*, 12(3), 206-218. DOI 10.1080/15275922.2011.595051
- Kim, Y. J., Gaddafi, A., & Yoshitake, I. (2016). Permeable concrete mixed with various admixtures. *Materials & Design*, 100, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.109>
- Li, H., Kayhanian, M., & Harvey, J. T. (2013). Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods. *Journal of Environmental Management*, 118, 144–152. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.016>
- Mallick, R., Teto, M., & Cooley, L. (1999). Evaluation of permeability of superpave mixes in Maine. *Maine Department of Transportation*.
- Meddah, M. S. y Bencheikh, M. (2009). Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3196-3205.
- Malek, M., Jackowski, M., Łasica, W., & Kadela, M. (2020). Characteristics of recycled polypropylene fibers as an addition to concrete fabrication based on Portland cement. *Materials*, 13(8), 1827. <https://doi.org/10.3390/ma13081827>
- Mulvaney, K. (2023). *El histórico clima extremo de este verano podría ser una señal de lo que está por venir*. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2023/09/clima-extremo-verano-historico-senal-futuro-viene>

- Naaman, A. E., Garcia, S., Korkmaz, M., and Li, V. C. (1996). "Investigation of the use of carpet waste PP fibers in concrete." *Proc., Mat. Engrg. Conf., K. Chong, ed., ASCE, New York*, 782–791.
- Nagy, Á., & Kuti, R. (2016). The environmental impact of plastic waste incineration. *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 15(3), 231–237.
<https://doi.org/10.32565/aarms.2016.3.3>
- OECD. (2022). *Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options*. OECD.
- Oviedo, I., Pradena, M., Link, Ó., & Balbó, J. T. (2022). Using Natural Pozzolans to Partially Replace Cement in Pervious Concretes: A Sustainable Alternative. *Sustainability*, 14(14122), 1–17.
- Pavez, M.(1999). Inundaciones y desarrollo urbano: algunas reflexiones sobre el debate. *Inundaciones y desarrollo urbano: algunas reflexiones sobre el debate*, 38(14), 3-14.
<https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/62098/66162>
- Pujadas, P. (2008). *Durabilidad del hormigón con fibras de polipropileno*. [Tesis, Universidad Politecnica de Catalunya, España]. Universidad Politécnica de Catalunya
- Parker, L. (2019). The world's plastic pollution crisis explained. *National Geographic*.
<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution>

- Pilz, S. E., Oliveira, P., Regoso, F., Paulon, V. A. y Costella, M. F. (2019). Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. *IBRACON Structures and Materials Journal*, 12(1), 101-121.
- Patrício Silva, A. L., Prata, J. C., Mouneyrac, C., Barcelò, D., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2021). Risks of Covid-19 face masks to wildlife: Present and future research needs. *The Science of the Total Environment*, 792(148505), 148505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148505>
- Reyes, F., & Torres, A. (2002). Efecto de las fibras plásticas sobre la flexión de estructuras de pavimento drenable. *Revista Ingeniería De Construcción*, 17(2), 93-102
- Rehder, B., Banh, K., & Neithalath, N. (2014). Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, 118, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.01.015>
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J. L., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177–192. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022014000100012>
- Rojas, O. (2015). *Cambios Ambientales y Dinámica de Inundaciones Fluviales en una Cuenca Costera del Centro Sur de Chile*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Concepción.
- Rodriguez, H. (2019). La degradación del plástico potencia el efecto invernadero. *National Geographic*.

<https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/degradacion-plastico-potencia-efecto-invernadero> 13126

Rojas, O., Latorre, T., Pacheco, F., & Araya, M. (2019). Inundaciones fluviales en cuencas costeras mediterráneas de Chile: recurrencia, factores físicos y efectos hidrogeomorfológicos de su gestión. *La Zona Costera en Chile: Adaptación y planificación para la Resiliencia*, 79-103.

Solminihaq, H., Videla, C., Fernández, B., & Castro, J. (2007). Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. *Materiales de Construcción*, 57(287), 23-36.

Shen, M., Huang, W., Chen, M., Song, B., Zeng, G., & Zhang, Y. (2020). (Micro)plastic crisis: Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. *Journal of Cleaner Production*, 254(120138), 120138.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120138>

The Nature Conservancy. (2021). Es ahora o siempre – Detengamos el flujo de residuos plásticos. *The Nature Conservancy*.

Touahri, Branci, Yahia, & Ezziane. (2021). Effect of recycled polypropylene fiber on high strength concrete and normal strength concrete properties. *Advances in materials Research*, 10(4), 267–281.
<https://doi.org/10.12989/amr.2021.10.4.267>

Vidal, C. & Romero, H. (2010). Efectos ambientales de la urbanización de las cuencas de los ríos Bío-bío y Andalién sobre los riesgos de inundación y anegamiento de la ciudad de Concepción. *Instituto de Geografía, Pontificia*

Universidad Católica de Chile.
<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/118084/EfectosAmbientalesde.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Verma, R., Vinoda, K. S., Papireddy, M., & Gowda, A. N. S. (2016). Toxic pollutants from plastic waste- A review. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 701–708. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.069>

Velandia Cabra, J. R. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*. 5, 115-140.

Valenzuela, R. (2023). *Inundaciones en Chile: “El Estado no está invirtiendo en tecnología”/ Entrevistado por Michelle Carrere*. Mongabay Latam.

Villar, J. (2022). *Análisis del desempeño estructural y constructabilidad de pavimentos de hormigón permeable para estacionamiento* [Tesis de pregado no publicada]. Universidad de Concepción.

Yuan, Z. y Jia, Y. (2021). Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 266.

Yao, W., Li, J., & Wu, K. (2003). Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 27–30. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00913-4](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00913-4)

Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., & Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 93, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105>

ANEXO 4.1 RESULTADOS POR PRUEBA

Tabla A.4.1 Resistencia a la tracción de cada prueba de las fibras estudiadas

| Fibra | Prueba | Resistencia a la tracción (MPa) |
|-------|--------|---------------------------------|
| PSF | 1 | 220,4 |
| | 2 | 198,5 |
| | 3 | 273,6 |
| | 4 | 408 |
| | 5 | 290,9 |
| MF | 1 | 6,7 |
| | 2 | 6,3 |
| | 3 | 5,3 |
| | 4 | 6,8 |
| | 5 | 6,4 |
| BBF | 1 | 168,9 |
| | 2 | 272,6 |
| | 3 | 129,7 |
| | 4 | 65,3 |
| | 5 | 310,4 |

Tabla A.4.2 Resistencia a compresión a 7 días de mezclas con MF

| Mezcla | Probeta | Resistencia a compresión (MPA) |
|---------|---------|--------------------------------|
| PC-P | 1 | 8,94 |
| | 2 | 8,22 |
| | 3 | 8,27 |
| | 4 | 9,77 |
| | 5 | 8,78 |
| PC-5.0M | 1 | 6,49 |
| | 2 | 8,34 |
| | 3 | 8,53 |
| | 4 | 7,43 |
| | 5 | 8,24 |
| PC-10M | 1 | 11,36 |
| | 2 | 11,87 |
| | 3 | 10,89 |
| | 4 | 11,97 |
| | 5 | 11,97 |

Tabla A.4.3 Resistencia a compresión a 28 días de mezclas con MF

| Mezcla | Probeta | Resistencia a compresión (MPA) |
|---------|---------|--------------------------------|
| PC-P | 1 | 15,40 |
| | 2 | 15,94 |
| | 3 | 14,45 |
| | 4 | 15,74 |
| | 5 | 16,83 |
| PC-5.0M | 1 | 10,86 |
| | 2 | 7,03 |
| | 3 | 11,48 |
| | 4 | 9,92 |
| | 5 | 11,18 |
| PC-10M | 1 | 16,61 |
| | 2 | 16,94 |
| | 3 | 18,42 |
| | 4 | 15,24 |
| | 5 | 15,57 |

Tabla A.4.4 Resistencia a flexión a 28 días de mezclas con MF

| Mezcla | Probeta | Resistencia a flexión (MPA) |
|---------|---------|-----------------------------|
| PC-P | 1 | 2,80 |
| | 2 | 2,68 |
| | 3 | 2,68 |
| | 4 | 2,94 |
| | 5 | 2,68 |
| PC-5.0M | 1 | 2,55 |
| | 2 | 2,83 |
| | 3 | 2,95 |
| | 4 | 2,97 |
| | 5 | 2,78 |
| PC-10M | 1 | 2,53 |
| | 2 | 2,36 |
| | 3 | 2,22 |
| | 4 | 2,47 |
| | 5 | 2,45 |

Tabla A.4.5 Permeabilidad 28 días de mezclas con MF

| Mezcla | Probeta | Tiempo (s) | Permeabilidad (cm/s) |
|---------|---------|------------|----------------------|
| PC-P | 1 | 20,66 | 0,49 |
| | | 20,65 | 0,50 |
| | | 20,78 | 0,49 |
| | 2 | 17,85 | 0,58 |
| | | 17,97 | 0,58 |
| | | 17,90 | 0,58 |
| | 3 | 17,67 | 0,59 |
| | | 17,63 | 0,59 |
| | | 17,75 | 0,59 |
| PC-5.0M | 1 | 17,56 | 0,60 |
| | | 17,10 | 0,62 |
| | | 17,66 | 0,60 |
| | 2 | 18,00 | 0,59 |
| | | 17,76 | 0,59 |
| | | 17,44 | 0,60 |
| | 3 | 11,10 | 0,95 |
| | | 11,05 | 0,95 |
| | | 11,35 | 0,93 |
| PC-10M | 1 | 8,53 | 1,24 |
| | | 8,08 | 1,30 |
| | | 7,83 | 1,35 |
| | 2 | 8,18 | 1,29 |
| | | 8,36 | 1,26 |
| | | 8,51 | 1,24 |
| | 3 | 10,43 | 0,98 |
| | | 10,05 | 1,02 |
| | | 10,45 | 0,98 |

Tabla A.4.6 Resistencia a la flexión a los 7 días

| Mezcla | Probeta | Resistencia a flexión (Mpa) |
|----------|---------|-----------------------------|
| PC-P | 1 | 2,40 |
| | 2 | 2,54 |
| | 3 | 2,30 |
| PC-2.5BB | 1 | 2,51 |

| | | |
|----------|---|------|
| | 2 | 2,54 |
| | 3 | 2,16 |
| PC-5.0BB | 1 | 2,28 |
| | 2 | 2,70 |
| | 3 | 2,30 |
| PC-5.0PS | 1 | 2,79 |
| | 2 | 2,66 |
| | 3 | 2,82 |
| PC-7.5PS | 1 | 2,08 |
| | 2 | 2,57 |
| | 3 | 2,37 |
| PC-MPS | 1 | 2,42 |
| | 2 | 2,16 |
| | 3 | 2,51 |
| PC-BBPS | 1 | 2,15 |
| | 2 | 2,57 |
| | 3 | 2,37 |

Tabla A.4.7 Resistencia a la compresión a los 7 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF

| Mezcla | Probeta | Resistencia a compresión (MPA) |
|----------|---------|--------------------------------|
| PC-5.0BB | 1 | 11,08 |
| | 2 | 11,27 |
| | 3 | 11,33 |
| | 4 | 10,21 |
| | 5 | 11,22 |
| PC-5.0PS | 1 | 13,70 |
| | 2 | 12,19 |
| | 3 | 13,59 |
| | 4 | 12,43 |
| | 5 | 10,69 |
| PC-MPS | 1 | 13,08 |
| | 2 | 12,85 |
| | 3 | 13,04 |
| | 4 | 12,27 |
| | 5 | 9,66 |

Tabla A.4.8 Resistencia a la compresión a los 28 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF

| Mezcla | Probeta | Resistencia a compresión (MPA) |
|----------|---------|--------------------------------|
| PC-5.0BB | 1 | 16,12 |
| | 2 | 13,62 |
| | 3 | 14,61 |
| | 4 | 15,98 |
| | 5 | 14,90 |
| PC-5.0PS | 1 | 20,07 |
| | 2 | 18,29 |
| | 3 | 17,67 |
| | 4 | 18,25 |
| | 5 | 19,98 |
| PC-MPS | 1 | 18,22 |
| | 2 | 18,19 |
| | 3 | 20,05 |
| | 4 | 19,03 |
| | 5 | 19,36 |

Tabla A.4.9 Resistencia a la flexión a los 28 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF

| Mezcla | Probeta | Resistencia a flexión (MPA) |
|----------|---------|-----------------------------|
| PC-5.0BB | 1 | 2,66 |
| | 2 | 2,70 |
| | 3 | 2,30 |
| | 4 | 2,81 |
| | 5 | 2,46 |
| PC-5.0PS | 1 | 2,80 |
| | 2 | 2,64 |
| | 3 | 2,95 |
| | 4 | 3,11 |
| | 5 | 3,39 |
| PC-MPS | 1 | 3,03 |
| | 2 | 2,87 |
| | 3 | 2,52 |
| | 4 | 2,84 |
| | 5 | 2,92 |

Tabla A.4.10 Permeabilidad los 28 días de las mezclas con BBF, PSF y la combinación entre MF y PSF

| Mezcla | Probeta | Tiempo (s) | Permeabilidad (cm/s) |
|----------|---------|------------|----------------------|
| PC-5.0BB | 1 | 13,78 | 0,76 |
| | | 13,26 | 0,79 |
| | | 13,51 | 0,78 |
| | 2 | 11,85 | 0,89 |
| | | 12,18 | 0,87 |
| | | 11,85 | 0,89 |
| | 3 | 14,20 | 0,74 |
| | | 14,11 | 0,75 |
| | | 14,05 | 0,75 |
| PC-5.0PS | 1 | 10,41 | 1,01 |
| | | 10,45 | 1,01 |
| | | 10,41 | 1,01 |
| | 2 | 13,36 | 0,79 |
| | | 13,47 | 0,78 |
| | | 13,87 | 0,76 |
| | 3 | 11,81 | 0,89 |
| | | 11,61 | 0,91 |
| | | 11,44 | 0,92 |
| PC-MPS | 1 | 13,71 | 0,77 |
| | | 13,66 | 0,77 |
| | | 13,55 | 0,78 |
| | 2 | 12,43 | 0,85 |
| | | 12,33 | 0,85 |
| | | 12,39 | 0,85 |
| | 3 | 10,64 | 0,99 |
| | | 10,76 | 0,98 |
| | | 10,78 | 0,98 |

Tabla A.4.11 Registro de las masas del ensayo a abrasión

| Mezcla | Masa inicial (kg) | Masa final (kg) |
|----------|-------------------|-----------------|
| PC-P | 11,27 | 7,03 |
| PC-5.0M | 11,20 | 7,85 |
| PC-5.0BB | 10,10 | 5,35 |
| PC-5.0PS | 10,47 | 7,21 |

Tabla A.4.12 Tasa de infiltración en la sección de pavimento

| Losa | Ubicación | Repetición | Masa (kg) | Tiempo (s) | Infiltración (m/s) | Infiltración (cm/s) |
|---------|-----------|------------|-----------|------------|--------------------|---------------------|
| S-PC-P | A | 1 | 3,6 | 62 | 3079,1 | 0,086 |
| | | 2 | 3,6 | 63 | 3030,3 | 0,084 |
| | | 3 | 3,6 | 63 | 3030,3 | 0,084 |
| | B | 1 | 18 | 87 | 10971,6 | 0,305 |
| | | 2 | 18 | 89 | 10725,1 | 0,298 |
| | | 3 | 18 | 88 | 10847,0 | 0,301 |
| | C | 1 | 3,6 | 90 | 2121,2 | 0,059 |
| | | 2 | 3,6 | 91 | 2097,9 | 0,058 |
| | | 3 | 3,6 | 88 | 2169,4 | 0,060 |
| S-PC-PS | A | 1 | 3,6 | 69 | 2766,8 | 0,077 |
| | | 2 | 3,6 | 66 | 2892,5 | 0,080 |
| | | 3 | 3,6 | 66 | 2892,5 | 0,080 |
| | B | 1 | 18 | 27 | 35353,1 | 0,982 |
| | | 2 | 18 | 27 | 35353,1 | 0,982 |
| | | 3 | 18 | 25 | 38181,3 | 1,061 |
| | C | 1 | 18 | 66 | 14462,6 | 0,402 |
| | | 2 | 18 | 65 | 14685,1 | 0,408 |
| | | 3 | 18 | 69 | 13833,8 | 0,384 |
| S-PS-BB | A | 1 | 3,6 | 70 | 2727,2 | 0,076 |
| | | 2 | 3,6 | 71 | 2688,8 | 0,075 |
| | | 3 | 3,6 | 73 | 2615,2 | 0,073 |
| | B | 1 | 18 | 56 | 17045,2 | 0,473 |
| | | 2 | 18 | 53 | 18010,1 | 0,500 |
| | | 3 | 18 | 53 | 18010,1 | 0,500 |
| | C | 1 | 18 | 58 | 16457,5 | 0,457 |
| | | 2 | 18 | 54 | 17676,5 | 0,491 |
| | | 3 | 18 | 60 | 15908,9 | 0,442 |
| S-PS-M | A | 1 | 3,6 | 95 | 2009,5 | 0,056 |
| | | 2 | 3,6 | 89 | 2145,0 | 0,060 |
| | | 3 | 3,6 | 97 | 1968,1 | 0,055 |
| | B | 1 | 18 | 84 | 11363,5 | 0,316 |
| | | 2 | 18 | 81 | 11784,4 | 0,327 |
| | | 3 | 18 | 85 | 11229,8 | 0,312 |
| | C | 1 | 18 | 75 | 12727,1 | 0,354 |
| | | 2 | 18 | 79 | 12082,7 | 0,336 |
| | | 3 | 18 | 75 | 12727,1 | 0,354 |

Tabla A.4.13 Permeabilidad con NCAT de la sección de pavimento

| Losa | Ubic. | Repetición | Tiempo (s) | Altura inicial (cm) | Altura Final (cm) | Permeabilidad (cm/s) |
|---------|-------|------------|------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| S-PC-P | A | 1 | 2,36 | 10 | 7 | 2,267 |
| | | 2 | 2,53 | 10 | 7 | 2,115 |
| | | 3 | 6,36 | 9 | 3 | 2,591 |
| | B | 1 | 14,58 | 13 | 3 | 1,509 |
| | | 2 | 14,95 | 13 | 3 | 1,471 |
| | | 3 | 15,40 | 13 | 3 | 1,428 |
| | C | 1 | 14,12 | 13 | 3 | 1,558 |
| | | 2 | 14,87 | 13 | 3 | 1,479 |
| | | 3 | 16,07 | 13 | 3 | 1,369 |
| S-PC-PS | A | 1 | 1,68 | 10 | 7 | 3,185 |
| | | 2 | 2,22 | 11 | 7 | 3,054 |
| | | 3 | 2,30 | 11 | 7 | 2,948 |
| | B | 1 | 1,26 | 5 | 3 | 8,252 |
| | | 2 | 1,23 | 5 | 3 | 8,453 |
| | | 3 | 1,26 | 5 | 3 | 8,252 |
| | C | 1 | 0,82 | 4 | 3 | 5,262 |
| | | 2 | 0,82 | 4 | 3 | 5,262 |
| | | 3 | 0,82 | 4 | 3 | 5,262 |
| S-PC-BB | A | 1 | 5,62 | 13 | 5 | 2,550 |
| | | 2 | 5,12 | 12 | 5 | 2,565 |
| | | 3 | 3,31 | 9 | 5 | 2,664 |
| | B | 1 | 2,60 | 7 | 3 | 4,888 |
| | | 2 | 2,70 | 7 | 3 | 4,707 |
| | | 3 | 2,71 | 7 | 3 | 4,690 |
| | C | 1 | 2,65 | 7 | 3 | 4,796 |
| | | 2 | 2,70 | 7 | 3 | 4,707 |
| | | 3 | 2,72 | 7 | 3 | 4,673 |
| S-PC-M | A | 1 | 23,03 | 10 | 3 | 0,784 |
| | | 2 | 22,47 | 10 | 3 | 0,804 |
| | | 3 | 22,87 | 10 | 3 | 0,790 |
| | B | 1 | 7,56 | 10 | 3 | 2,389 |
| | | 2 | 7,61 | 10 | 3 | 2,373 |
| | | 3 | 7,79 | 10 | 3 | 2,318 |
| | C | 1 | 5,73 | 10 | 3 | 3,152 |
| | | 2 | 5,68 | 10 | 3 | 3,180 |
| | | 3 | 5,7800 | 10 | 3 | 3,124 |

