



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO E HIDRÁULICO DE MEZCLAS
DE HORMIGÓN POROSO CON FIBRAS DE PLÁSTICO RECICLADO PARA
UTILIZACIÓN EN PAVIMENTOS**

POR

Karina Beatriz Montecinos Arias

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniera Civil

Profesor Guía
Mauricio Pradena Miquel

Agosto 2022
Concepción (Chile)

© 2022 Karina Beatriz Montecinos Arias

© 2022 Karina Beatriz Montecinos Arias

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

RESUMEN

La alta impermeabilización de la superficie de las ciudades genera diversos problemas, como la imposibilidad de infiltrar agua lluvia al subsuelo, el aumento de los volúmenes de escorrentía y los caudales máximos a evacuar y, además, la escorrentía urbana es una de las principales fuentes de contaminación difusa de los recursos hídricos. Una alternativa para solucionar estas problemáticas es la utilización de pavimentos permeables, sin embargo, estos poseen menores resistencias mecánicas que un pavimento tradicional. Una opción para mejorar su comportamiento mecánico y que permite, al mismo tiempo, valorizar un residuo, es la incorporación de fibra de plástico reciclado en el hormigón.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento mecánico e hidráulico de mezclas de hormigón poroso con fibras de plástico reciclado para su utilización en pavimentos. Para ello, se realizó un análisis de la literatura que permitiera determinar las dosis y tamaño de fibra óptimo a incorporar. Luego, se desarrolló un plan experimental en laboratorio mediante una estrategia de trabajo de dos etapas, confeccionando una mezcla patrón y cinco tipos de mezclas con fibra, con dosis de 0, 0,5, 1,5 y 2,5 kg/m³ y tamaños de 40 x 1 mm y 60 x 3,5 mm. Se realizaron ensayos de docilidad, resistencia a compresión, resistencia a flexotracción y permeabilidad.

Los resultados muestran que la incorporación de fibra de plástico reciclado mejora la resistencia a flexotracción del hormigón poroso, con incrementos de hasta 28,6 % a los 28 días y 61,8 % a los 7 días. Además, con la fibra de mayor tamaño en las dosis más altas, se obtiene buenos valores de resistencia a compresión con incrementos de hasta 40,6 % a los 28 días y 38,9 % a los 7 días respecto del hormigón de referencia. La permeabilidad de las mezclas disminuye al agregar la fibra de plástico, sin embargo, los valores se encuentran por sobre el valor mínimo de permeabilidad para hormigón poroso indicado en la literatura. El tamaño óptimo de la fibra fue de 60 x 3,5 mm y la dosis óptima fue de 0,5 kg/m³. Con estos valores se obtuvieron las mayores resistencias a flexotracción y una permeabilidad adecuada.

ABSTRACT

The high impermeability of the surface of cities generates several problems, such as the impossibility of infiltrating rainwater into the subsoil, the increase in runoff volumes and maximum flows to be evacuated. In addition, urban runoff is one of the main sources of diffuse contamination of water resources. An alternative to solve these problems is the use of permeable pavements; however, they have lower mechanical resistance than traditional pavements. An option to improve their mechanical behavior and, at the same time, to valorize waste, is the incorporation of recycled plastic fiber in the concrete.

The objective of this research was to evaluate the mechanical and hydraulic behavior of porous concrete mixtures with recycled plastic fibers for use in pavements. To this end, an analysis of the literature was carried out to determine the doses and optimum fiber size to be incorporated. Then, an experimental plan in laboratory was carried out using a two-stage work strategy, making a standard mixture and five types of mixtures with fiber, dosages of 0, 0,5, 1,5 and 2,5 kg/m³ and sizes of 40 x 1 mm and 60 x 3,5 mm. Tests were carried out for workability, compressive strength, flexural strength and permeability.

The results show that the incorporation of recycled plastic fiber improves the flexural strength of the porous concrete, with increases of up to 28,6 % at 28 days and 61,8 % at 7 days. In addition, with the larger fiber size at the higher dosages, good compressive strength values are obtained with increases of up to 40,6 % at 28 days and 38,9 % at 7 days with respect to the reference concrete. The permeability of the mixtures decreases with the addition of the plastic fiber, however, the values are above the minimum permeability value for porous concrete indicated in the literature. The optimum fiber size was 60 x 3,5 mm and the optimum dosage was 0,5 kg/m³. With these values, the highest flexural strengths and adequate permeability were obtained.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a aquellas personas que en este largo trayecto han acompañado mi caminar hacia la concreción de una anhelada meta. El esfuerzo y dedicación fueron mis alicientes para llegar hasta el final de este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Proyecto ANID PCI 2019/13269-4 “Sustainable and eco-efficient Pervious Concrete Pavements for Bikeways, Sidewalks and Parking Lots for mitigating rainwater runoff and heat islands in urban areas”.

Agradezco especialmente al profesor guía de esta investigación, Mauricio Pradena, por creer en mí y darme su apoyo tanto a nivel profesional como personal, lo cual fue fundamental para alcanzar esta meta. También, mis agradecimientos al profesor Oscar Link, por ser parte de la comisión de esta memoria de título, y aportar con su conocimiento y experiencia al desarrollo de esta.

A Don Carlos Bustos y Leslie, por su disposición, apoyo y carisma, lo cual permitió que el trabajo en el laboratorio de hormigones fuera óptimo y más llevadero.

Al profesor Carlos Medina, quién desde el comienzo tuvo una buena disposición y compromiso para llevar a cabo los ensayos a la fibra plástica.

Y, por último, a Leonardo Prieto de Ecobillones, quien tuvo una gran disposición en participar de este trabajo siendo proveedor del hilo de plástico reciclado utilizado en la segunda etapa de esta memoria.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología de trabajo.....	3
1.5 Principales resultados y conclusiones.....	3
1.6 Organización de la memoria.....	4
CAPÍTULO 2 FIBRA PLÁSTICA EN HORMIGÓN POROSO	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Necesidad de los pavimentos permeables	5
2.3 Hormigón poroso.....	6
2.4 Uso de la fibra plástica	7
2.5 Fibra de polipropileno	7
2.5.1 Efecto en la resistencia de hormigones porosos	7
2.5.2 Efecto en la permeabilidad de hormigones porosos	9
2.6 Fibra plástica reciclada	10
2.6.1 Efecto de la fibra plástica reciclada en hormigones	11
2.6.2 Caracterización mecánica y tratamientos del plástico reciclado	13
2.6 Conclusión.....	14
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	16
3.1 Introducción.....	16
3.2 Materiales	16
3.2.1 Agua.....	16
3.2.2 Cemento	16

3.2.3 Agregado grueso	17
3.2.4 Agregado fino	18
3.2.5 Fibra de plástico reciclado	19
Elaboración de fibra de plástico reciclado	19
Caracterización mecánica de la fibra	20
3.3 Estrategia de trabajo	22
3.3.1 Etapa 1	22
Plan de trabajo	23
3.3.2 Etapa 2	24
Plan de trabajo	24
3.4 Procedimientos experimentales	25
3.4.1 Dosificación	25
3.4.2 Confección	26
3.4.3 Ensayos	29
Resistencia a compresión	29
Resistencia a flexotracción	30
Permeabilidad	31
3.5 Conclusión	33
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	34
4.1 Introducción	34
4.2 Fibra de plástico reciclado	34
4.3 Etapa 1	35
4.3.1 Docilidad	36
4.3.2 Resistencia a compresión	36
4.3.3 Resistencia a flexotracción	37
4.3.4 Permeabilidad	39

4.4 Etapa 2	40
4.4.1 Docilidad.....	41
4.4.2 Resistencia a compresión	41
4.4.3 Resistencia a flexotracción	43
4.4.4 Permeabilidad	44
4.5 Efecto del tamaño de fibra y relación entre propiedades.....	45
4.6 Conclusión.....	49
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	51
GLOSARIO.....	53
REFERENCIAS	54
ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	59
ANEXO 4.1 RESULTADOS FIBRA DE PLÁSTICO RECICLADO	61
ANEXO 4.2 RESULTADOS ETAPA 1	63
ANEXO 4.3 RESULTADOS ETAPA 2	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resistencias a flexión luego de la adición de fibras a 28 días.....	8
Tabla 2.2 Resistencia a la tracción de fibras de plástico	13
Tabla 3.1 Caracterización Cemento Bío Bío Especial.....	17
Tabla 3.2 Propiedades físicas gravilla 3/8.....	17
Tabla 3.3 Granulometría gravilla 3/8.....	18
Tabla 3.4 Características físicas arena Bío Bío.....	18
Tabla 3.5 Granulometría arena Bío Bío.....	18
Tabla 3.6 Dosificación hormigón poroso.....	25
Tabla 4.1 Media aritmética y desviación estándar de parámetros de interés.....	35
Tabla 4.2 Resultados de docilidad de muestras de hormigón poroso etapa 1.....	36
Tabla 4.3 Resultados de docilidad de muestras de hormigón poroso etapa 2.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Influencia del tipo de fibra y su contenido en la resistencia a flexión	9
Figura 2.2 Influencia del contenido de PPF en la permeabilidad y porosidad.....	10
Figura 2.3 Variación de los parámetros de resistencia a flexión para diferentes mezclas.....	12
Figura 3.1 Fibra de PET reciclado utilizada en etapa 1.....	19
Figura 3.2 Fibra de PET reciclado utilizada en etapa 2.....	19
Figura 3.3 Máquina de ensayo universal Zwick Roell Z005.....	21
Figura 3.4 Dispositivo creado para ensayo de resistencia a tracción.....	21
Figura 3.5 Programa experimental con 2 etapas consecutivas.....	22
Figura 3.6 Descripción del plan de trabajo de la etapa 1.....	23
Figura 3.6 Descripción del plan de trabajo de la etapa 2.....	24
Figura 3.8 Betonera utilizada en la confección.....	26
Figura 3.9 Medición de cono de Abrams.....	27
Figura 3.10 Viguetas de hormigón poroso en sala de curado.....	28
Figura 3.11 Ensayo de resistencia a compresión.....	29
Figura 3.12 Ensayo de resistencia a flexotracción	30
Figura 3.13 Estado de viguetas al finalizar el ensayo.....	30
Figura 3.14 Permeámetro de carga variable.....	31
Figura 3.15 Probeta cilíndrica con recubrimiento lateral de papel alusa y refuerzo en bordes.....	32
Figura 3.16 Probeta al interior del permeámetro.....	32
Figura 4.1 Resistencia a compresión de mezclas de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días.....	37
Figura 4.2 Resistencia a flexotracción de mezclas de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días.....	38
Figura 4.3 Permeabilidad de mezclas de hormigón poroso con fibra de a los 7 y 28 días.....	39
Figura 4.4 Resistencia a compresión de mezclas de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días.....	42
Figura 4.5 Resistencia a flexotracción de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días....	43
Figura 4.6 Permeabilidad de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días.....	44
Figura 4.7 Comparación de resistencia a compresión de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días.....	45
Figura 4.8 Comparación de resistencia a flexotracción de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días.....	46

Figura 4.9 Comparación de permeabilidad de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días.....	47
Figura 4.11 Relación entre permeabilidad y resistencia a flexotracción.....	48
Figura 4.12 Relación entre permeabilidad y resistencia a compresión.....	48

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

A medida que las ciudades crecen y se desarrollan, se construye una mayor cantidad de viviendas y se pavimentan más calles, lo cual se traduce en un aumento de la superficie impermeable de la ciudad. Al existir esta impermeabilización, cuando ocurren precipitaciones el agua lluvia no se infiltra al subsuelo dejando de contribuir al equilibrio de las aguas subterráneas y disminuyendo el agua disponible para abastecer las poblaciones de la zona (Cárdenas *et al.*, 2017). Por otro lado, aumentan los volúmenes de escorrentía y los caudales máximos a evacuar cada vez que llueve (De Solminihaç *et al.*, 2007). Respecto a la calidad de esta agua, García (2011) indica que las escorrentías urbanas generadas en tiempo de lluvia se caracterizan por tener niveles de contaminación similares a los de un agua residual tratada. La escorrentía urbana es una de las principales fuentes de contaminación difusa de los recursos hídricos (United States Environmental Protection Agency [U. S. EPA], 1990).

Una de las alternativas técnicas más atractivas para solucionar estas problemáticas es la utilización de pavimentos permeables. Este tipo de pavimento permite el drenaje y recolección de aguas lluvias, evita el escurrimiento superficial y la erosión de áreas aledañas, reduciendo el caudal máximo de aguas lluvias. Además, al ser poroso, reduce el efecto isla de calor y contribuye al ingreso de agua y oxígeno al terreno, lo que beneficia a las raíces de la vegetación (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [MINVU], 2017).

Debido a sus particulares características, como una mayor permeabilidad y volumen de vacíos, los pavimentos permeables tienen menores resistencias mecánicas que un pavimento tradicional. Una alternativa para mejorar su comportamiento mecánico, especialmente la resistencia por flexotracción, que es el tipo de resistencia más importante en pavimentos, es la incorporación de fibras de polipropileno comercial. Sin embargo, la producción de esta fibra tiene impactos económicos y ambientales, por un lado, se está produciendo una mayor cantidad de plástico, la cual conlleva una gran cantidad de energía involucrada en el proceso de producción y emisión de gases contaminantes a la atmósfera y, por otro lado, si no se gestionan los residuos, éstos llegan a vertederos o al mar, entre

otros daños al medioambiente. Por lo tanto, surge la necesidad de cambiar la fibra de polipropileno comúnmente utilizada por una alternativa sustentable, como por ejemplo el plástico reciclado.

Vivanco (2019) indica que durante el 2017 los plásticos reciclados alcanzaron 83.679 ton/año, equivalentes a un 8,5 % del plástico que se consume en Chile (990.000 ton/año), donde un 17 % (14.281 ton/año) corresponde a residuos sólidos urbanos. Esta cantidad de plástico se concentra en tereftalato de polietileno (PET), con un 55 % (7.889 ton/año). El resto es principalmente polietileno (PE) y polipropileno (PP). Estas cifras indican que gran parte del plástico producido no es reciclado, por lo que resulta importante valorizar este residuo. Además, el tipo de plástico que más se recicla de forma domiciliaria es el PET, el cual proviene principalmente de las botellas plásticas, por lo cual adquirir este material para convertirlo en fibra no significaría un proceso complejo.

Diversos estudios han analizado el comportamiento de morteros y hormigón tradicional con la adición de fibra de plástico reciclado obteniendo mejoras en la resistencia a flexotracción, sin embargo, existe escasa información acerca de hormigón poroso con fibra de plástico reciclado. De todas maneras, dados los buenos resultados que presenta en la literatura el hormigón poroso con fibra y el hormigón tradicional con fibra de plástico reciclado, se espera que la combinación de hormigón poroso con fibra de plástico reciclado genere un hormigón sustentable con mayores resistencias.

1.2 Objetivo general

Evaluar el comportamiento mecánico e hidráulico de mezclas de hormigón poroso con fibras de plástico reciclado para utilización en pavimentos.

1.3 Objetivos específicos

- 1) Caracterizar la fibra de plástico reciclado de acuerdo con sus propiedades mecánicas.
- 2) Identificar rangos teóricos de dosis y tamaño de fibra comercial y reciclada utilizados en mezclas de hormigón.

- 3) Comparar las propiedades en estado fresco y estado endurecido del hormigón poroso con plástico reciclado y el hormigón de referencia.
- 4) Comparar la permeabilidad del hormigón poroso con fibra de plástico reciclado y el hormigón de referencia.

1.4 Metodología de trabajo

La primera parte de la investigación correspondió a una revisión bibliográfica de estudios de hormigón poroso con adición de fibra plástica comercial y reciclada, y hormigón tradicional con fibra de plástico reciclado, para determinar un rango óptimo de dosis de fibra a incorporar, así como un largo y ancho óptimo de fibra plástica, lo cual se relaciona directamente con el segundo objetivo específico de este trabajo.

La segunda parte correspondió al trabajo experimental, el cual, en primer lugar, consistió en la caracterización de la fibra de plástico reciclado mediante la obtención de este material y el posterior trabajo en laboratorio para determinar principalmente su resistencia a tracción. Luego se consideró un programa experimental para las mezclas de hormigón poroso con fibra, el cual se dividió en dos etapas consecutivas. Se optó por esta estrategia para acotar el rango de estudio en base a los resultados obtenidos en la fase anterior, considerando la información obtenida en la primera parte de este trabajo. En cada etapa se midió docilidad, y resistencia a compresión, resistencia a flexotracción y permeabilidad del hormigón poroso a los 7 y 28 días.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Los resultados del trabajo experimental demuestran que la incorporación de fibra de plástico reciclado mejora la resistencia a flexotracción del hormigón poroso, con incrementos del 28,6 % a los 28 días y 61,8 % a los 7 días y, además, permite alcanzar valores de permeabilidad adecuados, los cuales se encuentran por sobre el mínimo indicado en la literatura. Respecto a la resistencia a compresión, se obtuvo buenos resultados, teniéndose altos valores en las mezclas con fibra de tamaño 60 x 3,5 mm en altas dosis, los cuales significan un incremento en la resistencia a los 28 días cercano al 40 %.

El tamaño óptimo es 60 x 3,5 mm, dado que alcanza los valores más altos de resistencia con una adecuada permeabilidad. Respecto a la dosis óptima de fibra, considerando un equilibrio entre resistencia y permeabilidad, es recomendable la dosis de 0,5 kg/m³. Con esta dosis se obtuvo la mayor resistencia a flexotracción, la cual es 2,79 MPa. Este valor es muy cercano a la exigencia para pavimentos permeables en Chile, por lo cual, si se considera una optimización, ya sea mediante un mejor método de compactación o el uso de aditivo, sería factible utilizarla en la construcción de pavimentos.

Por otro lado, al comparar los dos tamaños de fibra utilizados, se puede concluir que el mayor tamaño de fibra presenta resistencias mayores, tanto a compresión como flexotracción, y menores valores de permeabilidad. Esto es respaldado por las relaciones de resistencia y permeabilidad obtenidas, las cuales tienden a ser inversas y lineales.

1.6 Organización de la memoria

El presente informe consta de cinco capítulos. El segundo capítulo muestra una recopilación bibliográfica de los estudios realizados en hormigón tradicional y morteros con adición de fibra plástica reciclada, y hormigón poroso con adición de fibra comercial en el cual se desarrolla el segundo objetivo específico de esta memoria. En el tercero se presenta la metodología utilizada para desarrollar este trabajo, la cual incluye materiales utilizados, estrategia de trabajo, procedimientos, dosificaciones y ensayos realizados. En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos en esta investigación, además de un análisis de éstos. Finalmente, en el quinto capítulo se exponen las principales conclusiones del trabajo y futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2 FIBRA PLÁSTICA EN HORMIGÓN POROSO

2.1 Introducción

La sustentabilidad es un concepto que hoy en día tiene gran importancia en el sector de la construcción. Uno de los grandes desafíos del desarrollo sustentable es la construcción de infraestructura que permita el desarrollo de ciudades competitivas a nivel global y que faciliten, al mismo tiempo, la utilización eficiente de los recursos ambientales.

En este capítulo se presenta a los pavimentos permeables como una alternativa sustentable en las ciudades, la cual sería posible potenciar en términos de sustentabilidad y mejorar respecto a sus propiedades mecánicas, mediante la incorporación de fibra plástica reciclada. Se expone un compilado de investigaciones que han estudiado el comportamiento mecánico del hormigón poroso con fibra comercial de polipropileno y hormigón tradicional con fibra plástica reciclada, estableciendo rangos óptimos de dosis y tamaño de fibra. Además, se caracteriza a la fibra plástica, con énfasis en la fibra de plástico PET reciclado.

2.2 Necesidad de los pavimentos permeables

El proceso de urbanización tradicional de las ciudades ha generado grandes superficies impermeables, las cuales se componen principalmente de pavimentos, viviendas e industrias. García (2011) señala que, al comparar una cuenca urbanizada con sus condiciones previas, se advierte que en ellas escurre superficialmente un mayor volumen de agua, disminuyen la infiltración y la humedad en el suelo, aumentan significativamente los caudales máximos de crecidas con un tiempo de respuesta menor, y aumenta la cantidad y concentración de contaminantes. Una afectación adicional al medioambiente se tiene en el incremento de las temperaturas en áreas localizadas dentro de las zonas urbanas causada por la falta de humedad y a la retención de la radiación solar (Cárdenas *et al.*, 2017). A este fenómeno se le conoce como isla de calor, el cual es un problema principalmente en los meses de verano cuando las olas de calor pueden afectar negativamente la salud de las personas (Haselbach *et al.*, 2011).

Esta impermeabilización del suelo, debida en gran parte por la presencia de pavimentos de hormigón tradicional, puede ser disminuida construyendo pavimentos permeables. Estos pueden ser aplicados en áreas de circulación peatonal, espacios deportivos, estacionamientos, tazas de árboles, ciclovías, drenes longitudinales y laterales (MINVU, 2017).

Los pavimentos permeables permiten la transpiración natural del suelo, la recarga del agua subterránea, con los consecuentes beneficios de las cuencas hidrográficas y el crecimiento de vegetación y árboles. La evapotranspiración y el color claro del material permiten disminuir la temperatura de la superficie del pavimento y su capacidad calorífica, lo cual conduce a una reducción del efecto isla de calor (Haselbach *et al.*, 2011). En cuanto a la calidad del agua y del aire, está comprobado que el uso de hormigón poroso puede reducir los contaminantes del tráfico (Bonicelli *et al.*, 2016). Es más, la estructura porosa del hormigón permeable retiene parte del contaminante sólido urbano (como zinc y cobre) en su matriz porosa (Haselbach *et al.*, 2014). El uso de hormigón poroso evita que el agua forme charcos evitando los brillos nocturnos, el hidroplaneo y los problemas de salpicaduras. Además, produce ventajas económicas al reducir la necesidad de infraestructura de drenaje y los requisitos de iluminación urbana gracias a su superficie clara (Bonicelli *et al.*, 2016).

2.3 Hormigón poroso

El hormigón poroso está definido como un hormigón con un asentamiento cercano o igual a cero, de estructura abierta que consiste en cemento, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, aditivos y agua. La combinación de estos materiales produce un material endurecido con poros interconectados, cuyo tamaño varía de 2 a 8 mm, lo que permite el paso del agua. El contenido de vacíos puede variar de un 15 a un 35 %, con resistencias a compresión típicas de 2,8 a 28 MPa. Su velocidad de drenaje depende del tamaño del agregado y de la densidad de la mezcla, pero generalmente se encuentra en el rango de 0,14 a 1,22 cm/s (American Concrete Institute, [ACI], 2010).

Debido a estas particulares características, el hormigón poroso tiene resistencias mecánicas más bajas que las de un hormigón tradicional. Beeldens *et al.* (2003) afirma esto, indicando que las resistencias a la compresión, tracción y flexión en el hormigón poroso son menores que en un hormigón tradicional debido a su alta porosidad y falta de agregados finos.

2.4 Uso de fibra plástica en hormigones

Una alternativa para mejorar la resistencia a flexión y flexotracción del hormigón poroso puede ser la incorporación de fibra plástica, dado que el uso de fibras en el hormigón es un paso efectivo para la prevención de la expansión de micro-grietas y grietas, y compensa la falta de resistencia a la tracción del hormigón (Seung *et al.*, 2012).

Además de la resistencia a tracción y flexión, la incorporación de fibra de refuerzos en materiales cementicios puede mejorar la tenacidad flexural, la resistencia a abrasión y el control de la fisuración, entre otros efectos (Araya *et al.*, 2019). Sumado a esto, Nobili *et al.* (2013) indica que la adopción de fibras puede mitigar el rápido deterioro de los pavimentos de hormigón, lo que puede causar pérdida de capacidad de servicio y condiciones de conducción inseguras.

2.5 Fibra de polipropileno

Una de las fibras más utilizadas es la fibra de PP. Su uso es más apropiado que el uso de fibras metálicas debido a la corrosión y la necesidad de mejorar la resistencia a la flexión, un requerimiento fundamental para los pavimentos de hormigón (S. E. Pils *et al.*, 2019). Por su parte, Elizondo *et al.* (2020) indica que estas fibras se utilizan para evitar la aparición de fisuras en el hormigón provocadas por la humedad, reduciendo así las fisuras. Además, se puede aumentar la resistencia a la compresión y a la flexión y, en caso de falla, las fibras pueden mantener la integridad estructural, evitando que el pavimento se derrumbe.

El PP es químicamente inerte, no absorbe agua, no se oxida, tiene un bajo costo y es accesible (S. E. Pils *et al.*, 2019), la gran mayoría de las fibras plásticas comerciales corresponden a este material.

2.5.1 Efecto en la resistencia de hormigones porosos

Debido a la disminución de la resistencia del hormigón poroso comparado con un hormigón tradicional, la incorporación de fibra plástica de polipropileno surge como una alternativa para

incrementar esta propiedad. Dado que se analiza el hormigón para su utilización en pavimentos, se revisó principalmente los estudios que indican el efecto de la fibra en la resistencia a flexión y tracción indirecta.

Kevern *et al.* (2014) investigaron los efectos de dos largos de fibra (38 y 56 mm) con tres dosis de fibra (1,5, 3,0 y 4,5 kg/m³). Se obtuvo que, con ambos largos de fibra, la dosis mayor presentó los mayores valores de resistencia a tracción indirecta, con aumentos del 44,1 % para la fibra 38 mm y 47,1 % para la fibra de 56 mm. S. E. Pils *et al.* (2019) trabajaron con fibra de polipropileno de 50 mm de longitud, obteniendo que la presencia de fibras mejoró la resistencia a la flexión sin perjudicar la permeabilidad, aunque disminuyó la resistencia a compresión. La Tabla 2.1 muestra los resultados de resistencia a flexión a los 28 días, donde los mejores valores se obtienen a mayor cantidad de fibra.

Tabla 2.1 Resistencias a flexión luego de la adición de fibras a 28 días

Mezcla	Resistencia (MPa)	% a 28 días en relación con la mezcla de referencia
D: referencia - sin fibra	2,49	100,0
D1: con 1 kg/m ³ de fibra	1,26	50,6
D2: con 2 kg/m ³ de fibra	2,74	110,0
D3: con 4 kg/m ³ de fibra	2,92	117,3

Fuente: S. E. Pils *et al.* (2019)

Por otro lado, Zhu *et al.* (2020) trabajaron con fibras de polipropileno (PPF), fibra de polipropileno gruesa (PPTF) y fibra de acero revestida de cobre (CCF). La PPF presentaba un largo de 12 mm y un ancho de 0,80 mm, en dosis de 0,36, 0,64 y 0,91 kg/m³. La influencia del tipo de fibra y su contenido en la resistencia a la flexión se muestra en la Figura 2.1. Se observa que, para PPF, a medida que aumenta su cantidad, aumenta la resistencia a flexión, teniendo un máximo de 3,37 MPa con un contenido de fibra de 0,91 kg/m³. En el caso de la fibra de PPTF, el comportamiento es diferente, dado que se alcanza un valor máximo, luego del cual la resistencia disminuye a mayor cantidad de fibra. Se obtuvo una mejora en la resistencia a la flexión con incrementos de 32,05 % para las PPTF y 30,12 % para las PPF.

Sandy et al. (2017) trabajaron con fibras naturales de coco y fibras artificiales de polipropileno. La incorporación de fibra al hormigón poroso disminuyó los valores de resistencia a compresión, sin embargo, los valores de resistencia a tracción indirecta tuvieron incrementos del 35,7 % para la fibra de polipropileno y 21,8 % para la fibra de coco.

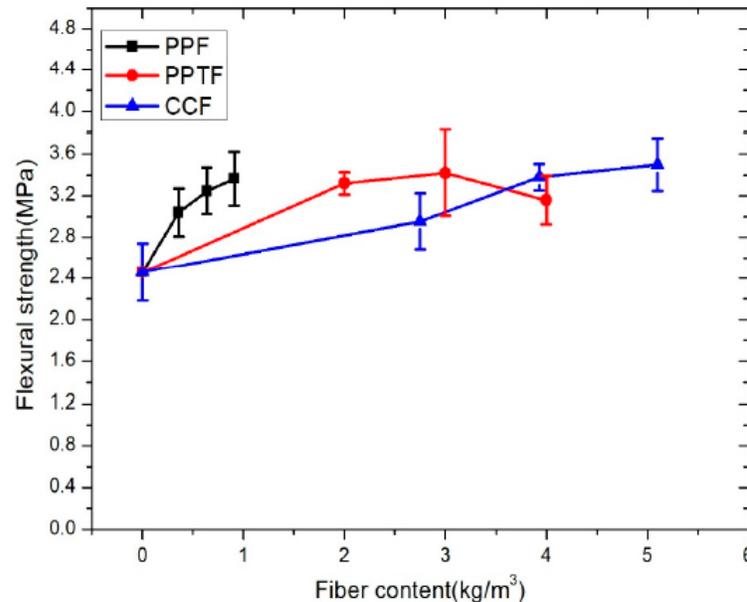


Figura 2.1 Influencia del tipo de fibra y su contenido en la resistencia a flexión

Fuente: Zhu *et al.* (2020)

2.5.2 Efecto en la permeabilidad de hormigones porosos

Neithalath *et al.* (2010) indica que la permeabilidad es la característica de rendimiento más importante de los hormigones porosos y, como ocurre con cualquier material poroso, las propiedades de transporte dependen inherentemente de las características de la estructura de los poros.

Kevern *et al.* (2014) obtuvieron que, respecto a la mezcla de control, la adición de fibra plástica produjo una disminución, la cual va desde un 10,1 hasta un 73,9 %. Los porcentajes de disminución más bajos se obtuvieron para la dosis de 1,5 kg/m³. Por otro lado, Zhu *et al.* (2020) midieron el efecto del tipo de fibra y su contenido en la permeabilidad. La Figura 2.2 muestra los valores obtenidos con PPF. Para un contenido de fibra de 0,36 kg/m³ se produce un leve aumento del coeficiente de

permeabilidad, comparado con la mezcla sin fibra, llegando a 6 mm/s. luego este comportamiento decae para mayores cantidades de fibra.

Un resultado similar es el obtenido por S. E. Pils *et al.* (2019), en donde la adición de fibra de polipropileno aumenta levemente la permeabilidad, pero sólo para una cantidad de 1 kg/m³. En las demás dosis de fibra, se produce una disminución de este parámetro a medida que aumenta la cantidad de fibra, lo cual indica que los niveles deben permanecer por debajo de 4 kg/m³. Por otro lado, Elizondo *et al.* (2020) trabajó con fibras de polipropileno de 54 mm de longitud en dosis de 1,9, 3,4 y 7,2 kg/m³. Respecto a los resultados de permeabilidad, el hormigón patrón obtuvo 1,2 cm/s mientras que las mezclas con fibra presentaron valores entre 1,0 y 1,1 cm/s.

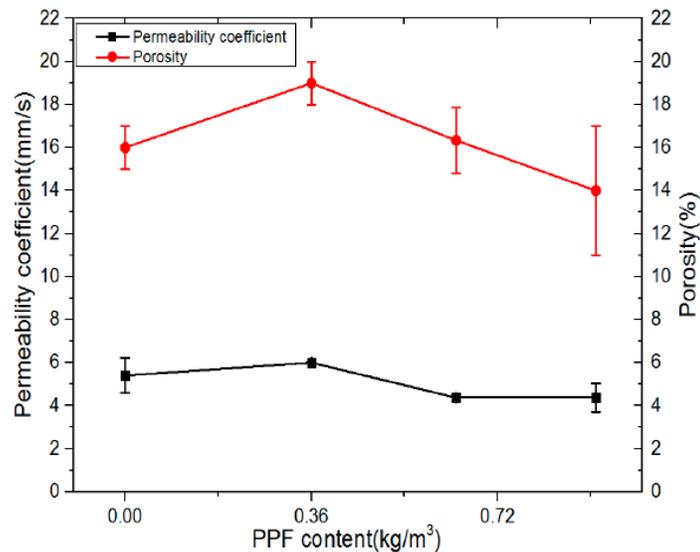


Figura 2.2 Influencia del contenido de PPF en la permeabilidad y porosidad

Fuente: Zhu *et al.* (2020)

2.6 Fibra plástica reciclada

Ante la necesidad de generar un hormigón poroso más sustentable es importante considerar alternativas a la fibra de polipropileno. El Ministerio de Medio Ambiente (2015), indica que, dentro de la jerarquía en el manejo de residuos la primera medida es prevenir su generación, de tal forma que se reduzca la cantidad de plástico virgen circulante. La segunda alternativa en esta jerarquía es la valorización, esto es, el aprovechamiento de los recursos presentes en los productos (preparación para

el reuso), materia prima (reciclaje) o fuente de energía (valorización energética). De esta manera, surge la alternativa de trabajar con fibras de plástico reciclado, abordando así ambas medidas del manejo de residuos.

En gran parte de la literatura se trabaja con fibra reciclada de PET. Este es un material comúnmente utilizado en la fabricación de botellas plásticas y es el plástico reciclado más estudiado en hormigón y morteros (Mercante *et al.*, 2018). Fraternali *et al.* (2011), Pereira de Oliveira y Castro-Gomes (2011), Pelisser *et al.* (2012), Ojeda *et al.* (2020) y Anandan y Alsubig (2021) trabajaron con este tipo de plástico, ya sea en hormigones o morteros, y observaron un aumento en la resistencia a la flexión y flexotracción debido a la adición de fibras. En otras investigaciones se utilizó bolsas de plástico recicladas (Ghernouti *et al.*, 2015) y fibra de polietileno de baja densidad (LDPE) reciclado (Dhanani y Bhimani, 2016), obteniendo también buenos resultados.

2.6.1 Efecto de la fibra plástica reciclada en hormigones

Dado que hay escasez de literatura acerca de fibra de plástico reciclado en hormigones porosos, es un buen antecedente los efectos en los hormigones tradicionales, por lo cual se presenta el efecto de la fibra en ambos tipos de hormigones.

Se encontraron dos investigaciones en las cuales se trabajó en hormigones porosos. Reyes y Torres (2002) evaluaron la resistencia a flexión y tracción indirecta de mezclas poroso con tiras de desechos de bolsas plásticas de dos tamaños. Se determinó que los mayores incrementos en resistencia a flexión fueron obtenidos por la tira de 20 x 4 mm adicionada en un 0,10 % del volumen del hormigón (37,8 %), mientras que la tira de 10 x 2 mm en dosis de 0,05 % genera un 14,0 % de aumento. La dosis óptima obtenida fue 2,35 kg/m³. Por otro lado, Toghroli *et al.* (2020) determinaron que en general, la adición de fibra plástica reciclada no afecta significativamente la resistencia a flexión, a diferencia de la fibra de acero.

En las investigaciones con hormigón tradicional, Pelisser *et al.* (2012) trabajaron con largos de fibra de 10, 15 y 20 mm, y cantidades de 0,64, 2,25 y 3,9 kg/m³. Con la dosis mayor se obtuvo el mayor incremento en resistencia a flexión, el cual fue de un 19,2 %. Por su parte, Anandan y Alsubig (2021)

utilizaron dosis de 0,05, 0,10 y 0,15 % del volumen de hormigón, las cuales corresponden a 0,46, 0,92 y 1,38 kg/m³, respectivamente, con fibras de 15 mm de largo y 1,1 mm de ancho con distribución homogénea y tensión confinada (H y T, respectivamente). La Figura 2.3 muestra que para ambos tipos de distribución hay una dosis óptima de fibra, luego de la cual disminuye la resistencia a flexión. Si bien al pasar de 0,5 a 1,0 % aumenta la resistencia, al continuar aumentando desde 1,0 a 1,5 % la resistencia disminuye.

Fraternali et al. (2011) trabajó con fibras de PET reciclado procesadas en líneas de extrusión, las cuales medían 40 y 52 mm de largo y tenían un ancho cercano a 1 mm. La fibra de 40 mm fue la que obtuvo mejores resultados, con un incremento en la resistencia a la primera grieta del 41 %.

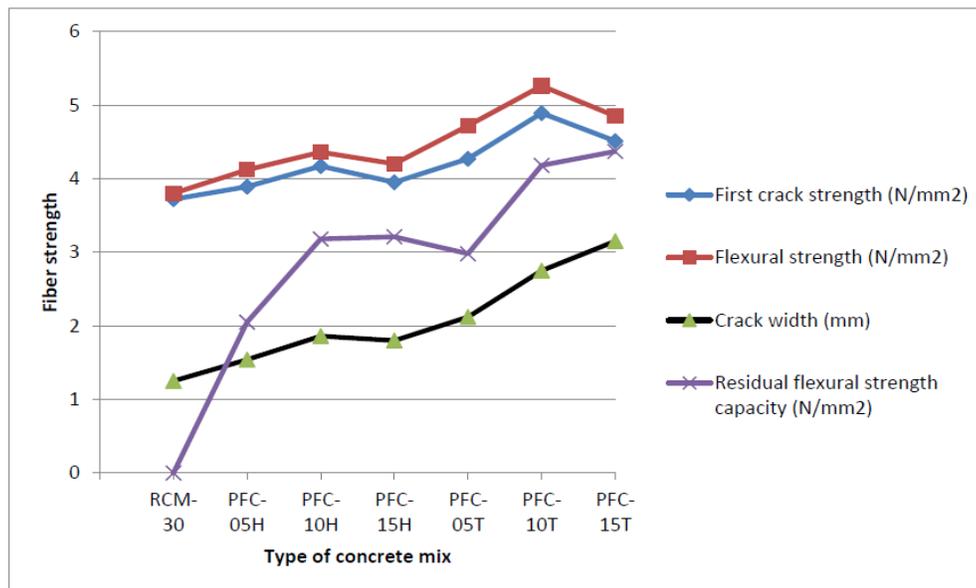


Figura 2.3 Variación de los parámetros de resistencia a flexión para diferentes mezclas

Fuente: Anandan y Alsubig (2021)

En las investigaciones con morteros, Pereira de Oliveira y Castro-Gomes (2011) introdujeron diferentes volúmenes de fibra a la mezcla, los cuales corresponden a 0,0 %, 0,5 %, 1,0 % y 1,5 %. Los resultados obtenidos indicaron que la incorporación de fibras de PET mejora significativamente la resistencia a la flexión de los morteros. El volumen máximo de fibras de PET para obtener una trabajabilidad deseada fue 1,5%. Por otro lado, Ojeda *et al.* (2020) realizaron una comparación entre el comportamiento de morteros con fibras de plástico reciclado PET y fibras comerciales. La fibra de

plástico reciclado tenía una longitud de 45 mm y un ancho de 2 mm, y se agregó en dosis de 1,5 kg/m³. Se obtuvo que la mezcla con fibras diseñadas de PET presentó los mejores resultados, con una resistencia a la flexión promedio de 3,5 MPa a los 28 días, lo cual significó un incremento del 68,3 % respecto al hormigón de referencia.

2.6.2 Caracterización mecánica y tratamientos del plástico reciclado

Un parámetro esencial en la caracterización mecánica de las fibras es su resistencia a tracción. La Tabla 2.6 muestra valores de resistencia a tracción para diferentes tipos de plásticos, tanto comerciales como reciclados. Se observa que los valores varían dependiendo si el plástico es comercial, reciclado procesado o sólo reciclado, siendo este último el que posee los menores valores (todos menores a 100 MPa). Respecto al tipo de plástico de interés de esta investigación, sólo Babafemi *et al.* (2018) entrega información acerca del PET reciclado, indicando un rango de resistencia a la tracción que va desde 55 a 80 MPa.

Tabla 2.2 Resistencia a la tracción de fibras de plástico

Año	Autor	Tipo de plástico	Resistencia a la tracción (MPa)
2007	Ochi et al.	PET procesado	352
		PP procesado	170
2015	Yin et al.	PP reciclado	35
		PP reciclado procesado	341,6
2018	Babafemi et al.	PET reciclado	55-80
		PE reciclado	18-30
		PVC reciclado	50-60
		PP reciclado	25-40
		PS reciclado	30-55
2019	S. E. Pils et al.	PP comercial	350
2020	Zhu et al.	PP comercial	Mayor o igual a 300

La Tabla 2.6 muestra, además, que los mayores valores de resistencia de plástico reciclado se obtienen en Ochi *et al.* (2007), con 352 MPa para la fibra de PET procesado, la cual se obtuvo al utilizar pellets reciclados de botellas PET como materia prima para la producción de fibra PET, proceso en el cual el pellet se derrite, se extruye desde una boquilla y se transforman en fibra mientras está caliente. Cuando el plástico fundido se estira de esta manera, las cadenas de polímero se alinean a lo largo de la dirección longitudinal de la fibra. Como resultado, la resistencia de la fibra aumenta en más de un orden de magnitud.

La desventaja de realizar un tratamiento como el descrito es que requiere de grandes cantidades de energía, involucra un proceso complejo y su costo es elevado en comparación con otras alternativas. Por esta razón, se recopiló información de un tratamiento más simple, realizado en diversas investigaciones y que fuera costo – efectivo, el cual corresponde al corte de botellas plásticas en tamaños de fibras. Fraternali *et al.* (2013) indica detalladamente un procedimiento para obtener la fibra plástica. Consiste en primer lugar, en el corte manual quitando el cuello y la base de las botellas de PET mediante unas tijeras comunes. Luego, se corta longitudinalmente la superficie lateral de las botellas obteniendo tiras macroscópicas de R-PET de 11 mm de ancho y 200 mm de largo, las cuales posteriormente se cortan en las dimensiones deseadas, obteniéndose la fibra de plástico reciclado.

Toghroli *et al.* (2020), Pereira de Oliveira y Castro-Gomes (2011), Ojeda *et al.* (2020) y Anandan y Alsubig (2021) utilizaron este tratamiento o uno similar para convertir botellas de PET, obteniendo incrementos en la resistencia a flexión en hormigones y morteros de 20,0, 48,0, 68,3 y 38,4 %, respectivamente.

2.6 Conclusión

Dado los múltiples beneficios que entrega los pavimentos permeables, resulta importante investigar acerca de cómo mejorar las mezclas de hormigones porosos, de tal manera que sea los pavimentos permeables sean una opción más atractiva para ser utilizados. Se investigó acerca de la incorporación de fibra plástica comercial, la cual mejora la resistencia a flexión o tracción indirecta del hormigón y disminuye su permeabilidad, sin embargo, los valores se encuentran dentro del rango establecido por el ACI (2010). Considerando que la producción de esta fibra genera impactos ambientales negativos,

se buscó una alternativa que fuera más amigable con el medioambiente, lo cual llevó hasta las fibras de plástico reciclado, de las cuales se escogió el PET. Las investigaciones muestran que la incorporación de este tipo de fibra también genera un efecto positivo en la resistencia a flexión y flexotracción de hormigón y mortero tradicional.

Se analizó el aumento de resistencia a flexión o flexotracción del hormigón dada la adición de fibra respecto al hormigón de referencia, observando que estos valores varían entre un 8,0 y 68,3 %. De esta manera, se determinó rangos de dosis y tamaño de fibra óptimos según la literatura. Respecto a la dosis, esta debe encontrarse entre 0,91 y 3,90 kg/m³ y en cuanto al tamaño de la fibra, el ancho debe ser cercano a 1 mm y el largo debe encontrarse entre 40 y 56 mm.

Por último, se caracterizó la fibra plástica de acuerdo con su resistencia a la tracción. Se observó que los mayores valores son alcanzados por el PET procesado reciclado y el PP virgen, dejando a las fibras de plástico reciclado con los valores más bajos, sin embargo, dentro de estos, el PET es aquel que alcanza mayor resistencia. Dado que el foco de esta investigación es la sustentabilidad, se considera el uso de PET reciclado mediante tratamiento simple, es decir, mediante el corte de botellas de plástico.

De esta manera, este capítulo contribuyó a establecer los lineamientos generales de esta investigación, entregando un rango de dosis y tamaño de fibra, qué tipo de plástico reciclado utilizar y qué tratamiento ocupar para convertirlo en fibra.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología, la cual se ordena según los objetivos específicos de esta investigación. Se define los materiales, la estrategia de trabajo, la dosificación a utilizar y se detalla el proceso de confección de probetas y de ensayos.

En primer lugar, para determinar el comportamiento de la fibra de plástico reciclado se realiza el ensayo de resistencia a tracción, lo cual permite comparar este material con la información presente en la literatura. Por otro lado, para evaluar el efecto de la incorporación de esta fibra en el comportamiento del hormigón poroso, tanto en estado fresco como endurecido, se realiza un análisis experimental mediante ensayos de laboratorio, en los cuales se compara los valores de docilidad, resistencia a compresión, resistencia a flexotracción y permeabilidad del hormigón poroso con fibra respecto al hormigón patrón.

3.2 Materiales

3.2.1 Agua

El agua utilizada para confección de las mezclas de hormigón poroso fue agua potable proveniente de la red pública que cumple con NCh 409/1, y que no se ha contaminado antes de su uso (Instituto Nacional de Normalización, [INN], 2012).

3.2.2 Cemento

Se utilizó cemento disponible en el mercado local, el cual corresponde a cemento Bío Bío Especial. De acuerdo con la norma NCh 148 Of68, se clasifica según su composición y resistencia como cemento de clase puzolánico, grado corriente. En específico, el cemento puzolánico es el producto

que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso y que puede aceptar hasta un 3 % de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado (INN, 1968). Sus propiedades se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Caracterización Cemento Bío Bío Especial

Propiedades	Valor
Peso específico (g/cm ³)	2,8
Expansión en autoclave (%)	0,1
Fraguado inicial (h:m)	2:40
Fraguado final (h:m)	3:40
Pérdida por calcinación (%)	3,0
SO ₃ (%)	3,5
Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	
7 días	320
28 días	410

3.2.3 Agregado grueso

El agregado grueso utilizado fue gravilla 3/8", obtenida desde la empresa Áridos HH en Concepción, cuyo proveedor es la empresa Áridos Livio Maggi, la cual obtiene los áridos en la ribera del río Ñuble. En la Tabla 3.2 se presentan las propiedades físicas del agregado grueso y en la Tabla 3.3 su distribución granulométrica.

Tabla 3.2 Propiedades físicas gravilla 3/8

Propiedades	Valor
Densidad Real (kg/m ³)	2643,20
Densidad Real SSS (kg/m ³)	2682,58
Densidad Neta (kg/m ³)	2751,55
Absorción de agua (%)	1,49

Tabla 3.3 Granulometría gravilla 3/8

Tamiz	mm	Porcentaje que pasa (%)
3/4"	19,00	100,00
1/2"	12,50	100,00
3/8"	9,50	98,21
N° 4	4,75	9,52
N° 8	2,36	2,98
N° 16	1,18	1,19

3.2.4 Agregado fino

El agregado fino utilizado fue arena Bío Bío disponible en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción. Sus propiedades físicas y granulometría se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5, respectivamente.

Tabla 3.4 Características físicas arena Bío Bío

Propiedades	Valor
Densidad Real (kg/m^3)	2679,00
Densidad Real SSS (kg/m^3)	2729,00
Densidad Neta (kg/m^3)	2820,00
Absorción de agua (%)	1,90

Tabla 3.5 Granulometría arena Bío Bío

Tamiz	mm	Porcentaje que pasa (%)
N° 4	4,76	100,00
N° 8	2,38	98,98
N° 16	1,19	95,500
N° 30	0,59	77,17
N° 50	0,30	31,78
N° 100	0,15	3,18

3.2.5 Fibra de plástico reciclado

Elaboración de fibra de plástico reciclado

El primer paso para la obtención de la fibra de plástico reciclado fue la recolección de botellas de tereftalato de polietileno (PET). Luego, éstas se limpiaron y cortaron de tal forma que se obtuviera una lámina de plástico, la cual posteriormente se cortó manualmente en láminas más pequeñas de 40 mm de ancho. Finalmente, se cortó estas láminas transversalmente cada un mm, obteniéndose la fibra mostrada en la Figura 3.1.

El procedimiento descrito anteriormente fue realizado sólo para la etapa uno. Para la segunda etapa se trabajó con hilo de PET reciclado de aproximadamente 3,5 mm de espesor, el cual fue facilitado por la empresa Reciclados Leonardo Prieto E.I.R.L. Teniendo el hilo de plástico reciclado, se cortó cada 60 mm, obteniéndose la fibra plástica de la etapa dos, la cual se presenta en la Figura 3.2.



Figura 3.1 Fibra de PET reciclado utilizada en etapa 1



Figura 3.2 Fibra de PET reciclado utilizada en etapa 2

Caracterización mecánica de la fibra

La caracterización mecánica de la fibra de plástico reciclado fue realizada en el laboratorio de fabricación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción. En primer lugar, se obtuvo el espesor de las fibras de plástico reciclado. Luego, para medir la resistencia a tracción de la fibra plástica correspondía trabajar con la norma ASTM D638 – 14 *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2014) lo cual no fue posible, dado que para aplicarla habría sido necesario confeccionar las probetas requeridas por tal norma. Al tener botellas picadas en tamaño de fibra se habría tenido que preparar pélet y luego inyectar el material para conformar la probeta tipo V. Lamentablemente en el laboratorio no se tiene cómo peletizar, sólo inyectar, por lo tanto, no era posible construirla. Sin embargo, dado que se tenía hilo de PET, el cual tenía un ancho y espesor relativamente constantes era posible crear un sistema de montaje.



Figura 3.3 Máquina de ensayo universal Zwick Roell Z005

Teniendo la máquina de ensayo universal Zwick Roell Z005 (Figura 3.3), se elaboró un dispositivo que permitiera agarrar el hilo de PET reciclado en la máquina de ensayo y medir de manera correcta la resistencia, de tal manera que la rotura ocurriera en el centro del hilo y no en los bordes en los

cuales se sujetaba a la máquina. El dispositivo mostrado en la Figura 3.4 fue impreso en una máquina de impresión 3D, su forma está diseñada de tal forma que el hilo de PET tenga buen agarre y se mantenga estático durante la ejecución del ensayo.

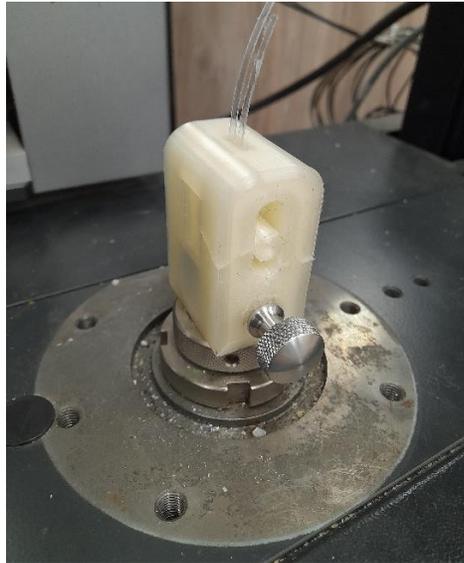


Figura 3.4 Dispositivo creado para ensayo de resistencia a tracción.

Respecto a la cantidad de pruebas, ASTM (2014) indica que, en el caso de materiales isotrópicos se debe ensayar al menos cinco pruebas, a pesar de que el ensayo no considera esta norma como tal, se tomó en cuenta este requerimiento. Sin embargo, para aumentar la confiabilidad de los datos, se decidió trabajar con 15 pruebas. El ensayo de resistencia a tracción del hilo de fibra plástica se realizó siguiendo de manera general el procedimiento indicado por ASTM (2014). En primer lugar, se cortó una muestra de hilo plástico cuyo largo se encontraba entre 1,0 y 1,5 m. Luego, se midió tanto el espesor como el ancho para ingresar estos datos al programa *testXpert II*. Posteriormente, se ajustó el hilo al dispositivo mostrado en la Figura 3.4, de tal manera que al extender el hilo este quedara estático, para luego instalarlo en la máquina de ensayo. Cuando el hilo se encontraba lo suficientemente tirante, se procedía a ejecutar el ensayo, en el cual desde la parte superior se extendía el hilo a una velocidad constante, hasta que alcanzaba la rotura en la zona central. Este procedimiento se realizó con cada una de las pruebas.

Teniendo los resultados de fuerza estándar versus deformación, y considerando lo indicado en la ASTM (2014), se realizó el cálculo de la resistencia a tracción, el cual consistió en dividir la carga

máxima sostenida por la muestra por el área transversal original promedio en el segmento de longitud calibrada de la muestra. Luego, se procesaron los datos obtenidos, dejando sólo aquellos en los cuales la prueba se llevó a cabo de manera correcta. Posteriormente se calculó el esfuerzo, considerando lo indicado en la ASTM (2014), que establece que se debe dividir la carga máxima sostenida por la muestra por el área transversal original promedio en el segmento de longitud calibrada de la muestra.

3.3 Estrategia de trabajo

Dada la cantidad de combinaciones de caso de esta investigación y para aumentar la información posible de obtener del comportamiento de las muestras, el programa experimental se dividió en dos etapas consecutivas, como se muestra en la Figura 3.5.

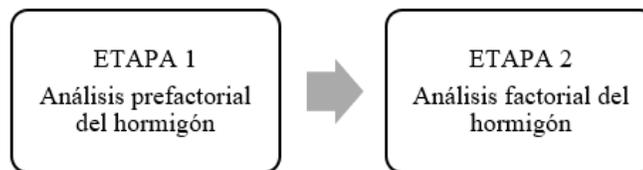


Figura 3.5 Programa experimental con 2 etapas consecutivas

Se optó por esta estrategia para acotar el rango de estudio en base a los resultados obtenidos en la fase anterior. De esta manera, para la primera etapa se definió un tamaño y dosis de fibra de acuerdo con la revisión de la literatura. Se trabajó con un rango de dosis de fibra, que permitiera luego determinar cuál dosis entregaba mejores resultados. Dado que con los resultados obtenidos no se pudo discriminar entre ambas dosis, en la etapa dos se trabajó nuevamente con ellas, agregando una variación intermedia. Se modificó el tamaño de la fibra, de tal forma que se pudiera observar su efecto en las propiedades mecánicas de la mezcla de hormigón poroso.

3.3.1 Etapa 1

Esta etapa fue creada tras el cumplimiento del segundo objetivo específico de esta memoria, de tal forma que se trabajara con un tamaño y dosis de fibra óptimo. Al obtenerse que el rango de dosis de

fibra con aumento de resistencia a flexotracción por sobre el 30 % y considerando un equilibrio con los valores de permeabilidad, es entre 0,92 kg/m³ y 3,9 kg/m³, se escogió una dosis inferior de 0,5 kg/m³ y una dosis superior de 2,5 kg/m³. Respecto al tamaño, se obtuvo que el ancho de fibra comúnmente utilizado es cercano a 1 mm, por lo cual se escogió esta dimensión, descartando valores menores dado que sería poco práctico cortar la fibra manualmente en dimensiones menores. En cuanto al largo de fibra, se tenía un amplio rango de valores, por lo cual se decidió limitar a los largos que generaran un aumento de resistencia a flexotracción mayor al 40 %, teniéndose un rango entre 40 y 56 mm. Así, para la primera etapa se decidió trabajar con el valor más bajo, el cual es 40 mm, con la idea de trabajar con un valor cercano a 56 mm en la etapa 2, lo cual permitiera analizar el efecto de aumentar el largo de fibra. Del análisis realizado, se consideró para la primera etapa un tamaño de fibra de 40 mm de largo por 1 mm de ancho, la cual fue obtenida desde la recolección de botellas de PET reciclado.

Plan de trabajo

La Figura 3.6 muestra los detalles de la primera etapa, la cual corresponde a un análisis prefactorial de las mezclas de hormigón poroso con fibra de plástico reciclado. Para ambas fases se consideran cuatro variables de investigación, la cuales son: tamaño de fibra, dosis de fibra, resistencia y edad. Respecto a la permeabilidad, este ensayo se realizó a una de las tres probetas cilíndricas que se ensayan posteriormente a compresión.

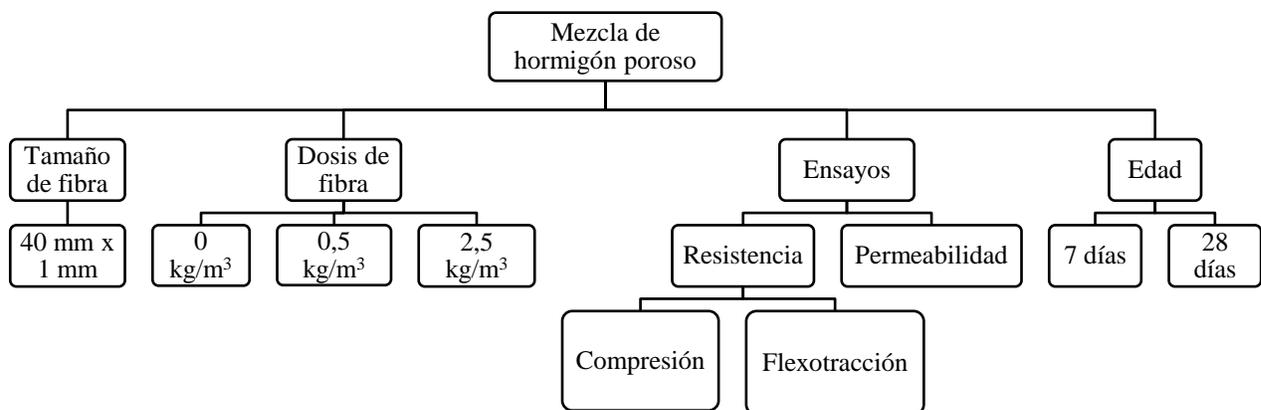


Figura 3.6 Descripción del plan de trabajo de la etapa 1

Específicamente para esta etapa, se tiene ocho combinaciones, y por cada una se confecciona tres probetas, con lo cual se tiene 24 probetas, de las cuales 12 son probetas cilíndricas y las otras 12 corresponden a viguetas. Además, se confecciona un hormigón poroso de referencia, con lo cual se agregan 12 probetas más, teniendo un total de 36 probetas para la etapa 1.

3.3.2 Etapa 2

Esta etapa se considera los resultados obtenidos en la etapa anterior y se busca encontrar una dosis y tamaño de fibra óptimo, analizando si existe un efecto del tamaño de fibra en el comportamiento de la mezcla de hormigón poroso. Se utiliza hilo de PET reciclado, el cual fue proporcionado por la empresa Reciclados Leonardo Prieto E.I.R.L., por lo cual el ancho de fibra quedó sujeto a la medida que podían proporcionar, la cual corresponde a aproximadamente 3,5 mm.

Respecto al largo de la fibra, en esta etapa se toma como referencia el valor superior del rango encontrado para la etapa 1, el cual era 56 mm, pero modificándolo levemente a 60 mm. De esta manera, se tiene un tamaño de fibra de 60 mm x 3,5 mm. Respecto a la dosis de fibra, se trabaja con las mismas cantidades de la etapa 1, de tal manera que se pueda analizar si existe un efecto del tamaño de la fibra en las propiedades del hormigón poroso, pero agregando una dosis intermedia, la cual permita además entregar información respecto al efecto de la dosis de fibra. De esta manera, se tiene para esta etapa tres dosis, las cuales son: $0,5 \text{ kg/m}^3$, $1,5 \text{ kg/m}^3$ y $2,5 \text{ kg/m}^3$.

Plan de trabajo

La Figura 3.7 muestra los detalles de la etapa 2, la cual consiste en un análisis factorial de las probetas de hormigón poroso con fibra de plástico reciclado, con el fin de analizar el efecto del tamaño de fibra y del aumento de la dosis. Se tiene 12 combinaciones, y por cada una se confecciona tres probetas, con lo cual se tiene un total de 36 probetas, de las cuales 18 son probetas cilíndricas y las otras 18 corresponden a viguetas.

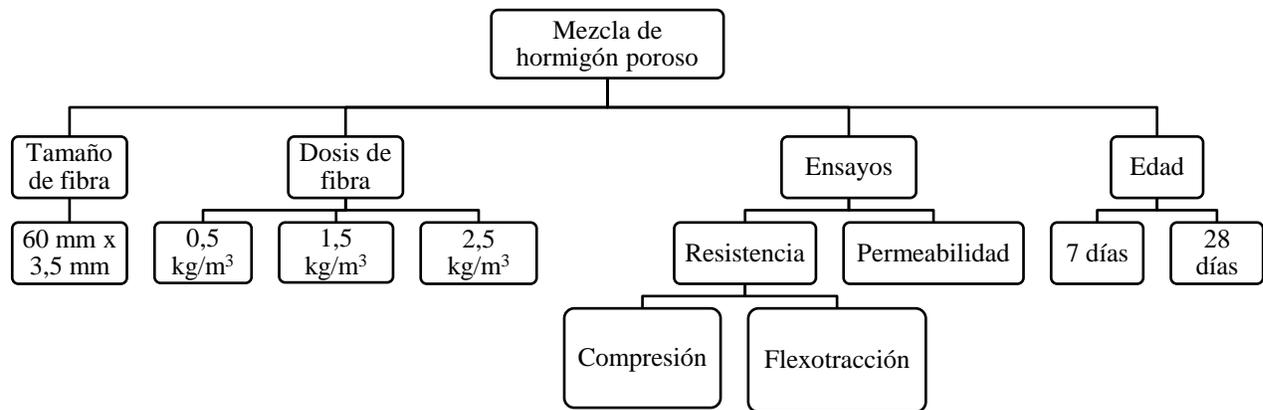


Figura 3.7 Descripción del plan de trabajo de la etapa 2

3.4 Procedimientos experimentales

3.4.1 Dosificación

La dosificación utilizada es tomada del trabajo realizado por Oviedo, I (2021) quien trabajó experimentalmente en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción, considerando como base el trabajo de Cires F. (2022).

Tabla 3.6 Dosificación hormigón poroso

Materiales y parámetros	Símbolo	Valor
Árido grueso (kg/m ³)	AG	1325,08
Árido fino (kg/m ³)	AF	265
Cemento (kg/m ³)	C	341,77
Agua (kg/m ³)	A	119,62
A/C	-	0,35
AF/AG (%)	-	20
AG/C	-	3,88
AF/C	-	0,78
K Nguyen	-	1,12

Esta dosificación es producto de un análisis acerca de parámetros como la relación agua cemento A/C, la cantidad de árido grueso AG y el porcentaje de árido fino sobre árido grueso (AF/AG), donde los mejores resultados para resistencia a compresión y permeabilidad se obtuvieron para la relación A/C 0,35 y AF/AG 20%.

La Tabla 3.6 muestra la dosificación utilizada sin corrección por humedad para los materiales presentes en laboratorio. La porosidad de diseño de esta mezcla es 15 %. Esta dosificación es utilizada para el hormigón patrón, en el caso de las mezclas que incorporan la fibra de plástico reciclado se mantiene tal dosificación y se agrega la dosis de fibra respectiva.

3.4.2 Confección

La elaboración de cada una de las mezclas comenzó con la medición de la humedad de la arena y gravilla a utilizar, con lo cual se corrigió la dosificación y, considerando el volumen a confeccionar y un 15 % de pérdidas, se determinó la cantidad de cada uno de los materiales.



Figura 3.8 Betonera utilizada en la confección

Luego, se procedió al pesaje de cada material para posteriormente pasar a la etapa de amasado utilizando la betonera de volteo, cuya capacidad es de 80 litros (Figura 3.8). Se comenzó añadiendo el árido fino y el árido grueso, posteriormente se agregó el cemento y se batió los componentes por

aproximadamente un minuto. Luego de esto, se añadió un 80 % del agua. Mientras la betonera seguía funcionando se fue agregando paulatinamente el resto del agua. Para el hormigón poroso patrón (0 % fibra de plástico), se mezcló por aproximadamente 5 minutos y para las mezclas que contenían fibra de plástico reciclado, apenas se terminó de agregar el agua se fue incorporando la fibra en pequeñas cantidades, de tal manera que su distribución dentro de la mezcla de hormigón fuera lo más homogénea posible. Una vez que se agregó todo el material se dejó la mezcla girando por 4 minutos. Luego, se dejó reposar para realizar el ensayo de docilidad y, terminado este, se introdujo nuevamente la mezcla de hormigón a la betonera, para terminar de mezclar durante un minuto más.

Para medir la docilidad de la mezcla se utilizó el cono de Abrams, siguiendo el procedimiento indicado en la NCh 1019 (INN, 2009a). Esta medición consiste en rellenar un molde metálico troncocónico de dimensiones normalizadas, en tres capas apisonadas con 25 golpes de varilla-pisón, luego se enrasa la superficie y se retira el molde, para ubicarlo en posición invertida al lado del hormigón moldeado y se apoya la varilla-pisón sobre el molde. Finalmente, se mide el asentamiento como la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie superior del hormigón (Figura 3.9).



Figura 3.9 Medición de cono de Abrams

Posteriormente, se realizó la etapa de llenado de los moldes cilíndricos y prismáticos. En el caso de los primeros, el material se agregó en tres capas de igual espesor, y en el caso de los moldes prismáticos, estos fueron llenados en dos capas de igual espesor. Al mismo tiempo que las probetas se iban llenando, se realizó la compactación. Es importante notar que el método de compactación utilizado en hormigones porosos difiere al ocupado en hormigones tradicionales. Bonicelli *et al.*

(2015) indican que el hormigón estándar se consolida vibrando el molde, pero el hormigón poroso no se puede vibrar debido al gran contenido de vacíos que se requiere y la posible formación de oquedades.

En las probetas cilíndricas se realizó compactación por apisonado en tres capas de 25 golpes distribuidos lo más homogéneamente posible. Este método es recomendado por el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) (Fernández *et al.*, 1998), y fue escogido al ser el que presenta mejores resultados y no tritura el material. En el caso de las viguetas, no existía información estandarizada disponible acerca de un método de compactación para hormigón poroso. Sin embargo, se seleccionó el método por apisonado indicado en la NCh 1017 (INN, 2009b), dada su similitud con el método establecido para probetas cilíndricas. El método por apisonado según la NCh 1017 (INN, 2009b) indica que para moldes cúbicos y prismáticos el hormigón se debe colocar en tres capas y se debe apisonar con varilla pisón distribuyendo los golpes en toda la sección del molde, a razón de ocho golpes por cada 100 cm² de superficie. Dadas las medidas de los moldes prismáticos presentes en el laboratorio de hormigones, se determinó 66 golpes por capa.

Una vez terminado el proceso de compactación se enrasó la superficie y se dejó fraguar a las probetas cilíndricas por 24 h y a las viguetas por 48 h a temperatura ambiente. El curado inicial se realizó con una lámina de polietileno transparente, la cual cubría a las probetas. Luego del fraguado se realizó el desmolde y etiquetado de las muestras considerando número de colada, tipo de muestra y edad.



Figura 3.10 Viguetas de hormigón poroso en sala de curado

Concluido lo anterior, las probetas fueron ingresadas a una cámara húmeda, la cual presenta una temperatura entre 17-23 °C y humedad superior al 90 %. Las probetas se mantuvieron en la sala de curado hasta cumplir su respectiva edad de ensayo (Figura 3.10).

3.4.3 Ensayos

Para la evaluación de las propiedades del material en estado endurecido se determinó ensayos de resistencia a compresión, flexotracción y permeabilidad. En el caso de la resistencia, tanto a compresión como flexotracción, esta se midió en las tres probetas confeccionadas por cada caso, para luego obtener el promedio simple como el resultado por caso. Por otro lado, la permeabilidad fue medida en 1 probeta cilíndrica por cada caso, realizándose tres mediciones y calculando el promedio simple de estos valores como el resultado de permeabilidad por caso.

Resistencia a compresión

La ejecución del ensayo de resistencia a compresión se basa en lo indicado en la norma NCh 1037 (INN, 2009c). El equipo utilizado es la máquina de ensayo universal *Controls Sercomp 7 LH 01.00.A*, en la cual se ingresa las dimensiones de la probeta cilíndrica, peso, edad y velocidad de carga. En muestras con edad 7 días la velocidad es 0,07 MPa/s y para aquellas con 28 días es 0,13 MPa/s.



Figura 3.11 Ensayo de resistencia a compresión

En la Figura 3.11 se observa el ensayo de resistencia a compresión realizado a una probeta de cilíndrica de hormigón poroso con fibra de plástico reciclado mientras es aplicada la carga.

Resistencia a flexotracción

La ejecución del ensayo de resistencia a compresión se basa en lo indicado en la norma NCh 1038 (INN, 2009d), con aplicación de carga $P/2$ aplicada en los límites del tercio central y con fractura de la probeta en el tercio central de la luz de ensayo. El equipo utilizado es la máquina de ensayo universal *Controls Sercomp 7 LH 01.00.C*, en la cual se ingresa las dimensiones de la vigueta, peso, edad y velocidad de carga. En este caso se utilizó una velocidad de carga de 0,005 MPa/s para ambas edades.



Figura 3.12 Ensayo de resistencia a flexotracción

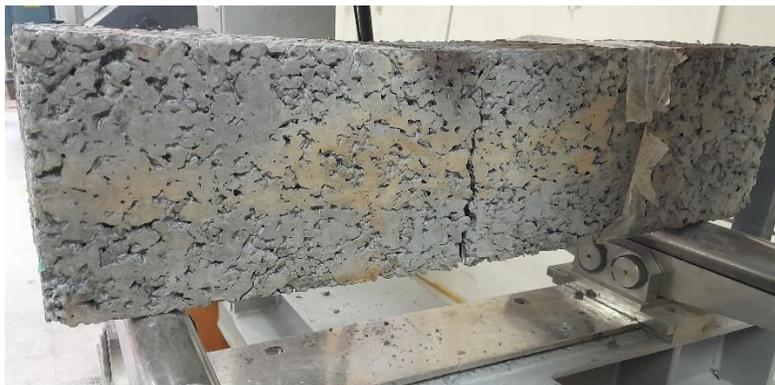


Figura 3.13 Estado de viguetas al finalizar el ensayo

La Figura 3.12 muestra el ensayo de resistencia a flexotracción mientras es aplicada la carga y la Figuras 3.13 muestra el estado de la vigueta luego que el ensayo ha terminado.

Permeabilidad

Para la medición de permeabilidad del hormigón, se trabajó con el Método de Carga Variable recomendado por el comité 522R del ACI (2010). Se utilizó un permeámetro disponible en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción, el cual se muestra en la Figura 3.14.



Figura 3.14 Permeámetro de carga variable

Para realizar el ensayo, primero se escoge una de las 3 probetas cilíndricas según su diámetro, de tal forma que sea fácil introducirla posteriormente dentro del permeámetro. Luego, se realiza el recubrimiento lateral de la probeta seleccionada con papel alusa, en el cual sus bordes superior e inferior se sellan con cinta de papel (Figura 3.15). Posteriormente, se colocan 2 tirantes de alambre fino de aproximadamente 1 mm de diámetro en forma ortogonal alrededor de la probeta, con el fin de poder introducirla y retirarla del permeámetro de manera sencilla para el operador.

Una vez realizado esto, se introduce la probeta en el permeámetro, el cual cuenta en la base con una unión de PVC perforada que le entrega altura a la muestra y permite el libre flujo de agua. Luego se coloca una cinta de goma Eva por todo el borde superior, entre el molde y la probeta, para asegurar

estanqueidad (Figura 3.16), realizado esto se procede a colocar el anillo de goma que ayuda a dejar estanco el sistema, y se introduce la parte superior del permeámetro, la cual se termina de sellar envolviendo la unión con cinta aisladora.



Figura 3.15 Probeta cilíndrica con recubrimiento lateral de papel alusa y refuerzo en bordes

Cuando el sistema se encuentra totalmente sellado, se agrega agua hasta que sale por el tubo de expulsión. Luego se espera unos minutos para que la muestra se sature totalmente, una vez ocurrido esto, se cierra la válvula de salida y se incorpora agua hasta la altura inicial, la cual corresponde a 40 cm. Posteriormente, se abre la válvula y se mide el tiempo que transcurre hasta que el agua llega a la altura final, la cual es 20 cm. Este procedimiento se realiza 3 veces, para obtener un valor promedio.



Figura 3.16 Probeta al interior del permeámetro

Finalmente, el coeficiente de permeabilidad (K) se calcula según las Ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$K = \frac{\alpha}{t} \quad (3.1)$$

$$\alpha = 2,303 \times \frac{A_e}{A_m} \times L \times \log\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.2)$$

Donde,

t: tiempo que demora entre h_1 y h_2 (seg).

A_e : área tubo de admisión (m^2).

A_m : área de la muestra (m^2).

L: largo de la muestra (m).

h_1 : altura inicial del agua (m).

h_2 : altura final del agua (m).

3.5 Conclusión

En este capítulo se presentó detalladamente los lineamientos que guiaron el trabajo práctico realizado en esta investigación. En primer lugar, se presentaron los materiales, poniendo énfasis en la fibra de plástico reciclado, lo cual está relacionado con el primero objetivo específico de esta memoria. Luego, se indicó la estrategia de trabajo, la cual se basa en dos etapas consecutivas las cuales surgieron del segundo objetivo específico. Posteriormente se describieron los procedimientos experimentales relacionados con el hormigón poroso, los cuales son dosificación, confección y ensayos, lo cual permite llevar a cabo los últimos dos objetivos específicos de esta investigación.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tanto para la fibra de plástico reciclado como para el hormigón poroso con incorporación de fibra de plástico reciclado, respecto a docilidad, resistencia a compresión, flexotracción y permeabilidad en cada una de las etapas. Junto con los gráficos se realiza un análisis explicativo y una comparación entre la mezcla patrón y las mezclas con fibra de plástico reciclado. Por último, se analiza el efecto del tamaño de fibra en las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso y se presentan relaciones entre resistencia y permeabilidad.

4.2 Fibra de plástico reciclado

Tal como se indicó en la Sección 3.2.5 del Capítulo 3, se realizó el ensayo de resistencia a tracción del hilo de fibra plástica siguiendo de manera general el procedimiento indicado por ASTM (2014). Los resultados obtenidos para las 15 pruebas realizadas se presentan en el Anexo 4.1 en la Figura A.1.1 y la Tabla A.1.1, y los resultados de las pruebas seleccionadas, los cuales fueron transformados a resistencia a tracción a la rotura se presentan en la Tabla A.1.2.

La Tabla 4.1 presenta la media aritmética y la desviación estándar de los valores espesor y ancho de fibra y resistencia a tracción a la rotura. Respecto a las dimensiones de la fibra, se observa que el ancho tiene una alta variación, con una desviación estándar de 0,53. Esto puede deberse a que la máquina utilizada para elaborar el hilo de PET reciclado es rudimentaria y no tiene la sensibilidad para cortar constantemente la medida exacta.

En cuanto a la resistencia a tracción a la rotura, existe una dispersión de los datos con valores que van desde los 36,5 a los 98,3 MPa y un promedio de 63,1 MPa. Esta variación puede explicarse por el origen del hilo, el cual está conformado por botellas de PET reciclado cuyo origen sólo es conocido por el proveedor del hilo plástico, y es posible que se haya utilizado diferentes marcas comerciales de

botellas, las cuales tengan diferentes valores de resistencia a la tracción. De todas maneras, los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Babafemi *et al.* (2018) en donde el rango de resistencia a la tracción para PET reciclado era entre 55 a 80 MPa.

Tabla 4.1 Media aritmética y desviación estándar de parámetros de interés

Parámetros	Media aritmética	Desviación estándar
Resistencia a tracción a la rotura (MPa)	63,09	19,17
Espesor de fibra a_0 (mm)	0,55	0,05
Ancho de fibra b_0 (mm)	3,47	0,53

La variación del comportamiento del hilo de PET reciclado entrega información respecto a que el hormigón poroso al que se adiciona este material incluye otro factor aleatorio, el cual es el comportamiento de la fibra plástica. De esta manera, si fuera posible, se debería seleccionar botellas PET de la misma marca o tipo, de tal manera que la resistencia a tracción a la rotura sea uniforme, disminuyendo las fuentes de variabilidad para que los resultados del hormigón poroso con fibra dependan sólo de las variables seleccionadas, que para este caso son principalmente el tamaño y dosis de fibra.

4.3 Etapa 1

Tal como se indicó en el Capítulo 3, esta etapa fue creada luego de analizar la revisión de literatura, de tal forma que se trabajara con un tamaño y dosis de fibra óptimo. El tamaño de fibra elegido fue 40 mm x 1 mm y las dosis fueron 0,5 kg/m³ y 2,5 kg/m³, con material obtenido de la recolección y corte de botellas de PET reciclado, además de una mezcla de referencia.

En los resultados que se presentan a continuación, se utiliza la nomenclatura HF-XX-YY, donde HF corresponde a Hormigón Poroso con Fibra, XX se refiere a la dosis de fibra utilizada e YY corresponde al largo de fibra.

4.3.1 Docilidad

Los resultados del ensayo de descenso de cono mediante el método de Cono de Abrams para las muestras de hormigón poroso patrón y hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se muestran en la Tabla 4.2.

El ACI (2010) indica que el hormigón poroso debe tener un asentamiento cercano o igual a cero, además al ser una mezcla de consistencia seca el rango va desde 0 a 2 cm. Se observa que todos los valores obtenidos se encuentran dentro del rango establecido. Además, no hay un efecto en la trabajabilidad de la mezcla al agregar fibra de plástico reciclado, dado que las diferencias con el hormigón patrón varían 0,5 cm a los 7 días y entre 0 - 1 cm a los 28 días, sin evidenciar algún comportamiento respecto a la dosis de fibra.

Tabla 4.2 Resultados de docilidad de muestras de hormigón poroso etapa 1

Edad	Mezcla	Descenso (cm)
7 días	Hormigón patrón	1,0
	HF-0,5-40	0,5
	HF-2,5-40	0,5
28 días	Hormigón patrón	1,0
	HF-0,5-40	0,0
	HF-2,5-40	1,0

4.3.2 Resistencia a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de muestras de hormigón poroso patrón y hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se muestran en la Figura 4.1. El resultado por probeta se presenta en el Anexo 4.2 en las Tablas A.2.1 y A.2.2 para edades de 7 y 28 días respectivamente.

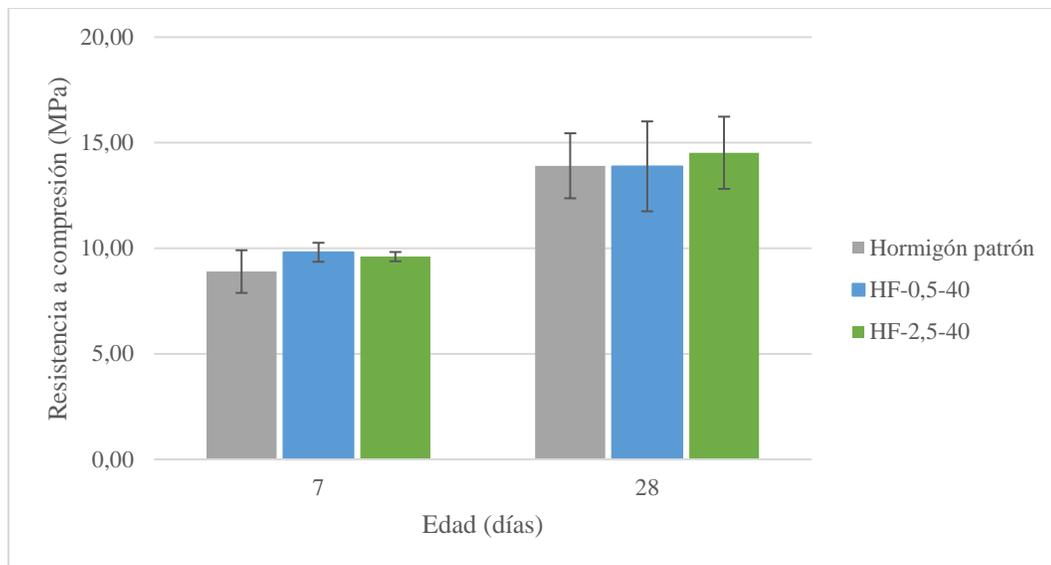


Figura 4.1 Resistencia a compresión de mezclas de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

Los resultados presentes en la Figura 4.3 coinciden con lo indicado en Rehder *et al.* (2014), donde, en general, no se encontró que las fibras influyeran en la resistencia a la compresión en un grado significativo, como se espera también para los hormigones convencionales.

Se observa que a los 7 días la mezcla con dosis de fibra $0,5 \text{ kg/m}^3$ presenta el valor de resistencia a compresión más alto, alcanzando los 9,81 MPa. Sin embargo, a los 28 días la mezcla con la dosis de fibra $2,5 \text{ kg/m}^3$ consigue el valor más alto, con 14,52 MPa. De todas formas, en ambas edades las diferencias en los valores de resistencia a compresión se encuentran dentro de la desviación estándar, por lo cual no son significativas.

4.3.3 Resistencia a flexotracción

Los resultados de los ensayos de resistencia a flexotracción de muestras de hormigón poroso patrón y hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se muestran en la Figura 4.2. El resultado por probeta se presenta en el Anexo 4.2 en las Tablas A.2.3 y A.2.4 para edades de 7 y 28 días respectivamente.

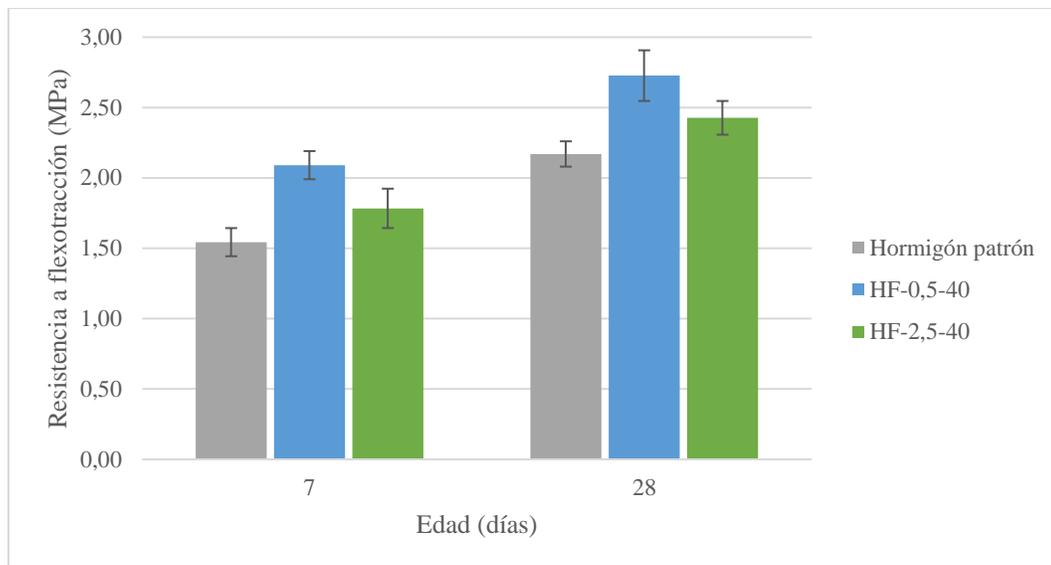


Figura 4.2 Resistencia a flexotracción de mezclas de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

Tal como se esperaba, la incorporación de fibra plástica reciclada generó un aumento en la resistencia a flexotracción del hormigón. Los valores máximos se obtienen con la dosis de $2,5 \text{ kg/m}^3$, los cuales comparados con la mezcla patrón, proporcionan un aumento del 35,5 y 25,7 % a los 7 y 28 días, respectivamente.

Este comportamiento es respaldado por Anandan y Alsubih (2021), quienes indican que la inclusión de fibras plásticas retarda la propagación de grietas y permite un mayor control de estas, mejorando así la resistencia a la flexión del hormigón. Además, las fibras plásticas controlan el crecimiento repentino del agrietamiento dentro de la matriz antes de alcanzar la carga máxima y su importancia radica en la mejora de la resistencia a la primera fisuración del hormigón. Ghernouti *et al.* (2015) también se refiere a esto, mencionando que el inicio de las fisuras se produjo antes en las probetas sin fibras que, en las probetas de hormigón reforzado con fibras, las cuales muestran una mejor resistencia al agrietamiento y capacidades de endurecimiento por deformación que las muestras sin fibras. Además, Hidalgo (2017) menciona que las fibras al reducir las pequeñas grietas que se producen en la matriz del hormigón aumentan la resistencia a la fisuración y la ductilidad del material, así como en menor grado, la resistencia a tracción.

4.3.4 Permeabilidad

Los resultados de los ensayos de permeabilidad de muestras de hormigón poroso patrón y hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se muestran en la Figura 4.3. El resultado por probeta se presenta en el Anexo 4.2 en las Tablas A.2.5 y A.2.6 para edades de 7 y 28 días respectivamente.

Se observa una disminución de la permeabilidad al agregar fibra de plástico reciclado al hormigón poroso, sin embargo, los valores se mantienen sobre el mínimo establecido por el ACI (2010), el cual es 0,14 cm/s. Esta disminución en la permeabilidad puede explicarse por la presencia de fibra en los poros conectados del hormigón, lo cual impediría el flujo del agua, a diferencia del hormigón patrón. Además, los resultados coinciden con lo obtenido por Kevern et al. (2014), quienes indican que las fibras disminuyeron la permeabilidad y las tasas de infiltración comparado con el hormigón patrón.

A los 7 días, la mezcla patrón alcanza una permeabilidad de 1,49 cm/s y las mezclas con dosis de 0,5 y 2,5 kg/m³ presentan una disminución respecto a esta del 26,2 y 54,6 %. Así, se observa que a medida que aumenta la dosis de fibra, disminuye la permeabilidad.

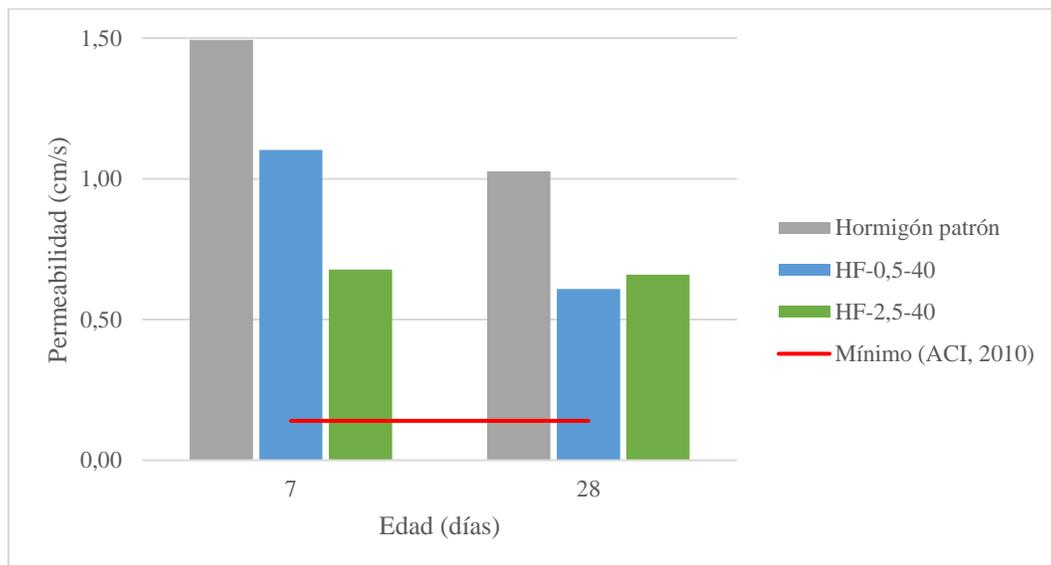


Figura 4.3 Permeabilidad de mezclas de hormigón poroso con fibra de a los 7 y 28 días

A los 28 días, también existe una disminución respecto al patrón, la cual es de un 40,7 y 35,9 % para las mezclas de 0,5 y 2,5 kg/m³ de fibra, respectivamente. Sin embargo, no es tan clara la tendencia observada a los 7 días, en la cual una mayor dosis de fibra implica una menor permeabilidad. Esto podría deberse principalmente a errores experimentales, dado que en el ensayo de permeabilidad sólo se considera una de las tres probetas de la colada, la cual puede diferir por la energía de compactación aplicada. Además, se observó cavidades en la probeta producto del método de compactación utilizado. Estas cavidades podrían permitir que el agua circule más fácilmente a través de la probeta, afectando los resultados de permeabilidad. Además, se observó que, de las tres probetas, a veces en una o dos se depositaba más material en el fondo, lo cual bloqueaba los poros, y, por ende, aunque el agua circulara fácilmente para entrar a la probeta, su salida se veía dificultada y, por lo tanto, ese factor podría afectar el resultado de permeabilidad obtenido.

4.4 Etapa 2

Tal como se indicó en el Capítulo 3, esta etapa considera los resultados obtenidos en la etapa anterior y en ella se busca encontrar una dosis y tamaño de fibra óptimo, analizando si existe un efecto del tamaño de fibra (largo y ancho) en el comportamiento de la mezcla de hormigón poroso.

Se utiliza hilo de PET reciclado, cuyas dimensiones son 60 mm de largo y 3,5 mm de ancho. Respecto a la dosis de fibra, se trabaja con las mismas cantidades de la etapa uno, para analizar si existe un efecto del tamaño de la fibra en las propiedades del hormigón permeable, pero agregando una dosis intermedia, la cual permita además entregar información respecto al efecto de la dosis de fibra. De esta manera, se tiene para esta etapa tres dosis, las cuales son: 0,5 kg/m³, 1,5 kg/m³ y 2,5 kg/m³.

En los resultados mostrados a continuación, se utiliza la nomenclatura HF-XX-YY, donde HF corresponde a Hormigón Poroso con Fibra, XX se refiere a la dosis de fibra utilizada e YY corresponde al largo de fibra. Si bien en esta etapa no se confeccionó nuevamente un hormigón patrón, se presenta sus resultados en los gráficos para permitir una comparación visual.

4.4.1 Docilidad

Los resultados del ensayo de descenso de cono mediante el método de Cono de Abrams para las muestras de hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Resultados de docilidad de muestras de hormigón poroso etapa 2

Edad	Mezcla	Descenso (cm)
7 días	HF-0,5-60	0,0
	HF-1,5-60	0,0
	HF-2,5-60	0,0
28 días	HF-0,5-60	0,5
	HF-1,5-60	0,0
	HF-2,5-60	0,0

A diferencia de la etapa uno, los resultados muestran que hay un leve efecto en la trabajabilidad de la mezcla al agregar fibra de mayor tamaño, dado que con el hormigón patrón se obtenía descensos de 1 cm a los 7 y 28 días. De esta manera, la presencia de fibra de plástico reciclado de tamaño 60 x 3,5 mm disminuye levemente la trabajabilidad, con diferencias entre 0,5 – 1 cm, sin embargo, estos valores continúan encontrándose dentro del rango establecido y se asimilan más aún a lo indicado en el ACI (2010), ya que en la mayoría de las mezclas se obtiene un asentamiento cercano o igual a cero.

Por otro lado, es importante notar que no hay un efecto de la cantidad de la fibra agregada a la mezcla en la trabajabilidad, puesto que, a los 7 y 28 días, al aumentar la dosis de fibra prácticamente no se obtienen diferencias en el descenso del cono.

4.4.2 Resistencia a compresión

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de muestras de hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se presentan en la Figura 4.4. El resultado por probeta se presenta en el Anexo 4.3 en las Tablas A.3.1 y A.3.2 para edades de 7 y 28 días respectivamente.

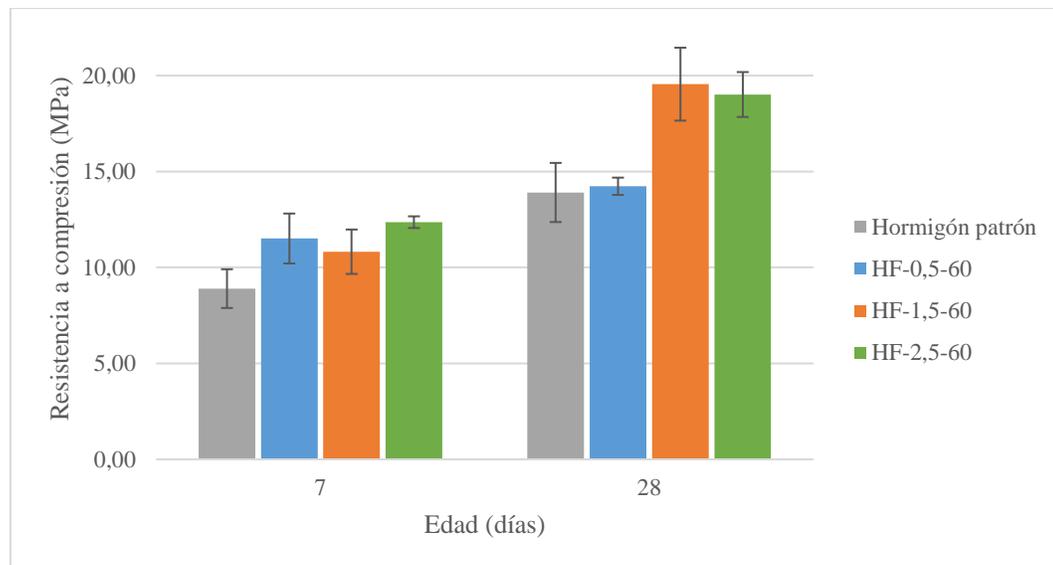


Figura 4.4 Resistencia a compresión de mezclas de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

A los 7 días, si bien existe un aumento en la resistencia dada la presencia de fibra, sólo con las dosis $0,5 \text{ kg/m}^3$ y $2,5 \text{ kg/m}^3$ existe una diferencia significativa. A los 28 días, la mezcla con $0,5 \text{ kg/m}^3$ de fibra aumenta levemente respecto al patrón, siendo esta diferencia menor a la desviación estándar, y, por lo tanto, no significativa. Sin embargo, para las mezclas con dosis $1,5$ y $2,5 \text{ kg/m}^3$ se alcanzan resistencias superiores, las cuales son un $40,6$ y $36,7 \%$ mayores a la obtenida por el hormigón patrón. Contrario a lo ocurrido en la primera etapa, se obtuvo muy buenos resultados con las mezclas de dosis de fibra más altas, alcanzándose un máximo de $19,55 \text{ MPa}$ para la mezcla de $1,5 \text{ kg/m}^3$. Un resultado similar fue obtenido por Zhu *et al.* (2020), donde el aumento de la cantidad de fibras añadidas aumentó la resistencia a la compresión discretamente hasta un gran aumento.

Anandan y Alsubih (2021) midieron la tenacidad de las muestras antes del *peak*, obteniendo que las mezclas con fibra presentaron mayores valores que la mezcla de referencia. Indicaron que la región endurecida por deformación previa al *peak* es una medida indirecta en función de la generación de microfisuras con el correspondiente aumento de la resistencia máxima del material compuesto, de esta manera, la fibra contribuyó al control de las microfisuras. Además, las fibras presentes en la matriz tendieron a retrasar el origen de las grietas y posteriormente controlaron su multiplicación en la matriz, lo que llevó a una mejora en la tensión de la primera grieta. Por otro lado, las fibras no puentearon la apertura de grietas en el modo de compresión, sino que actuaron como redistribución de tensiones para un proceso de falla controlado. Además, en el caso de las mezclas de hormigón con alta

incorporación de fibras, la mayor disponibilidad de fibras en el modo de apertura de la grieta prevé una redistribución efectiva de las tensiones en la vecindad de la grieta, con lo cual se obtuvo una mayor resistencia a compresión. Yang *et al.* (2022) coinciden con Anandan y Alsubih (2021) afirmando que la adición de fibras puede unir eficazmente el agregado y el mortero de cemento en una sola unidad, mejorando así la compacidad general de la muestra, inhibiendo la expansión y extensión de las microfisuras internas y, finalmente, logrando el efecto de mejorar la resistencia a la compresión.

4.4.3 Resistencia a flexotracción

Los resultados de los ensayos de resistencia a flexotracción de muestras de hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se presentan en la Figura 4.5. El resultado por probeta se presenta en el Anexo 4.3 en las Tablas A.3.3 y A.3.4 para edades de 7 y 28 días respectivamente.

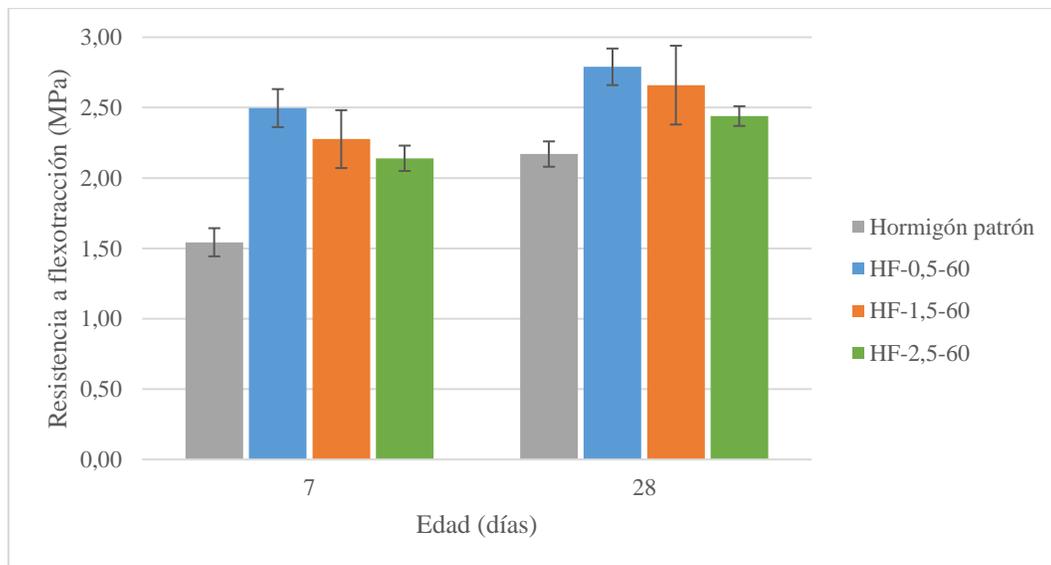


Figura 4.5 Resistencia a flexotracción de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

La Figura 4.5 muestra que, al igual que en la etapa uno, la adición de fibra de plástico reciclado mejora la resistencia a flexotracción del hormigón poroso, observándose altos valores de resistencia a los 7

días, las cuales corresponden a un 89, 86 y 88 % de la resistencia medida a los 28 días para las mezclas de 0,5, 1,5 y 2,5 kg/m³, respectivamente.

Por otro lado, comparando con el hormigón patrón a los 7 días, se obtiene un aumento del 61,8 %, 47,5 % y 38,7 % para las mezclas con dosis de fibra 0,5, 1,5 y 2,5 kg/m³, respectivamente. A los 28 días también aumenta la resistencia, aunque en porcentajes más bajos que a los 7 días, teniéndose un 28,6 %, 22,6 % y 12,4 % de aumento, para las mezclas con dosis de fibra 0,5, 1,5 y 2,5 kg/m³, respectivamente.

Cabe destacar que los valores más altos de resistencia a flexotracción son obtenidos por la dosis de 0,5 kg/m³, lo cual también ocurre en la etapa uno. De esta manera, en ambos tamaños de fibra, la dosis menor es aquella que entrega los mejores valores de resistencia a flexotracción.

4.4.4 Permeabilidad

Los resultados de los ensayos de permeabilidad de muestras de hormigón poroso con adición de fibra de plástico reciclado a los 7 y 28 días se muestran en la Figura 4.6. El resultado por probeta se presenta en el Anexo 4.3 en las Tablas A.3.5 y A.3.6 para edades de 7 y 28 días respectivamente.

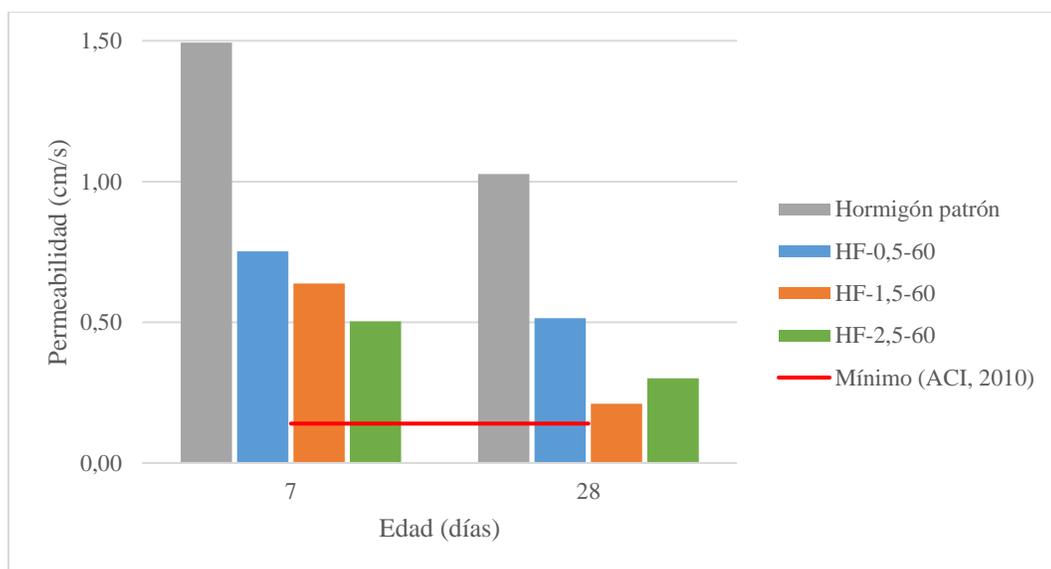


Figura 4.6 Permeabilidad de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

A diferencia de la etapa uno, se observa una mayor disminución de la permeabilidad al agregar fibra de plástico reciclado de mayor tamaño al hormigón poroso. De todas formas, los valores continúan manteniéndose sobre el mínimo establecido por el ACI (2010). Los menores valores de permeabilidad son 0,21 cm/s y 0,30 cm/s, obtenidos por las mezclas con dosis de fibra 1,5 y 2,5 kg/m³ a los 28 días.

A los 7 días, es posible observar claramente una relación inversa entre dosis de fibra y permeabilidad. Sin embargo, a los 28 días, esta tendencia no es igual, puesto que la mezcla con dosis de fibra intermedia presenta la menor permeabilidad, la cual luego aumenta para la dosis de 2,5 kg/m³. Tal como se explicó para la etapa uno en la Sección 4.3.4, es posible que este resultado esté afectado por errores experimentales, principalmente ocasionados en el proceso de compactación de las probetas.

4.5 Efecto del tamaño de fibra y relación entre propiedades

Con los resultados de las dos etapas fue posible determinar el efecto del tamaño de la fibra en las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso, además de establecer relaciones entre propiedades. Las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 muestran el efecto del tamaño de la fibra a los 7 y 28 días respecto a resistencia a compresión, resistencia a flexotracción y permeabilidad, respectivamente.

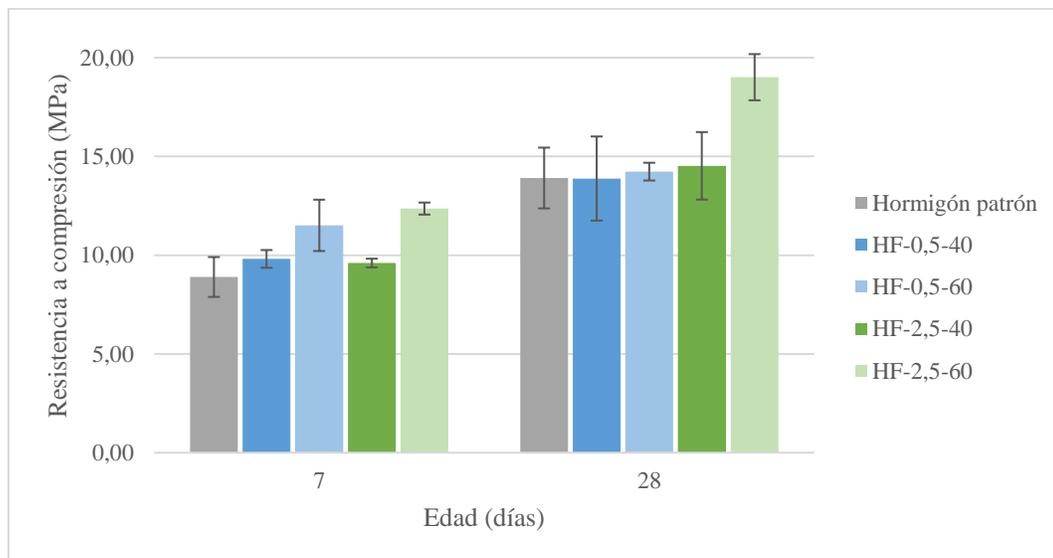


Figura 4.7 Comparación de resistencia a compresión de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

Se observa que tanto a los 7 como 28 días, la mezcla con dosis $0,5 \text{ kg/m}^3$ no muestra ningún efecto respecto al tamaño de la fibra, dado que las diferencias entre la fibra de 40 y 60 mm son menores a la desviación estándar, considerándose no significativas. Respecto a esto, es posible que $0,5 \text{ kg/m}^3$ sea una dosis de fibra muy pequeña como para observar un efecto en la resistencia a compresión al modificar su tamaño. Respecto a la dosis de $2,5 \text{ kg/m}^3$ sí se evidencia un efecto del tamaño de la fibra, dado que, a los 7 días, la fibra de $60 \times 3,5 \text{ mm}$ tiene una resistencia a compresión un 28,7 % mayor que la fibra de $40 \times 1 \text{ mm}$, y a los 28 días, este aumento es de un 30,9 %, con lo cual se puede afirmar que tanto a los 7 como 28 días se obtienen resultados aproximadamente un 30% mejores con la fibra de mayor tamaño.

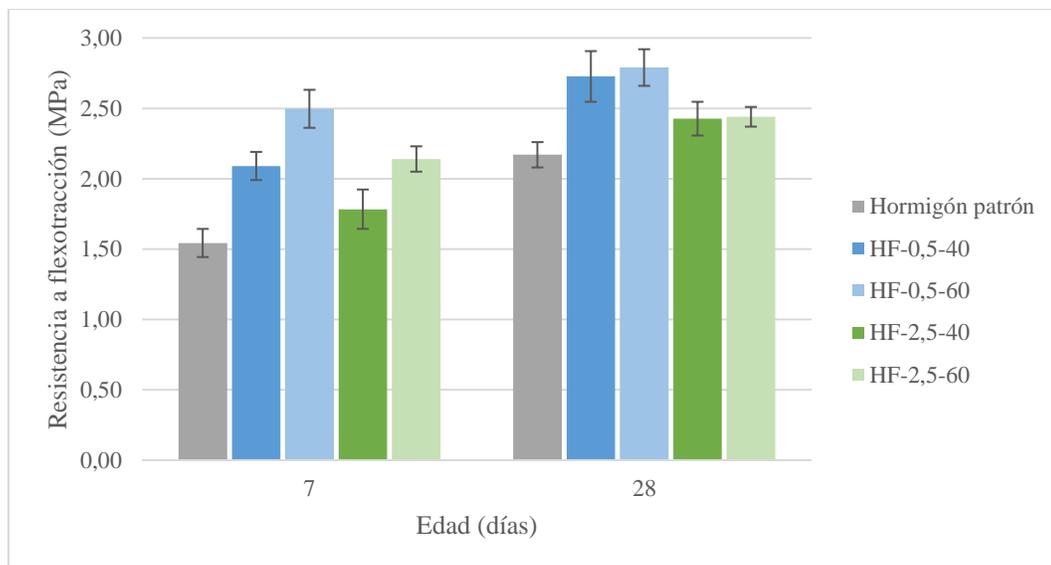


Figura 4.8 Comparación de resistencia a flexotracción de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

En la Figura 4.8 se observa que el comportamiento es levemente diferente a lo ocurrido en el caso de la resistencia a compresión, dado que se observa a los 7 días un efecto del tamaño de la fibra en ambas dosis, donde nuevamente se evidencia que el mayor tamaño proporciona una mayor resistencia, teniéndose incrementos del 19,4 % con la dosis de $0,5 \text{ kg/m}^3$ y 20,0 % con la dosis de $2,5 \text{ kg/m}^3$, lo cual indica que los resultados con fibra de mayor tamaño a los 7 días son aproximadamente un 20 % mayores que con la fibra de menores dimensiones. Sin embargo, a los 28 días no es posible afirmar que la fibra de mayor tamaño presente un comportamiento mejor dado que con la dosis $0,5 \text{ kg/m}^3$ el aumento es muy leve y con $2,5 \text{ kg/m}^3$ los resultados son prácticamente iguales. De todas formas, no existe una disminución en la resistencia con la fibra de mayor tamaño, por lo cual en base a los

resultados presentados en las Figuras 4.7 y 4.8 es posible afirmar que la fibra de mayor tamaño entrega mejores valores de resistencia en el hormigón poroso con fibra de plástico reciclado.

Los resultados de resistencia coinciden con lo obtenido por Kevern *et al.* (2014), quien trabajó con tres diferentes dosis y dos tamaños. Aunque los resultados de resistencia a compresión y tracción indirecta no fueron significativos, se observó que la fibra más larga (56 mm) presentaba los valores más altos de resistencia, lo cual fue más evidente en los resultados de resistencia a tracción indirecta, teniéndose por ejemplo que, para la dosis más baja, la fibra de 56 mm obtuvo una resistencia a tracción indirecta un 14,3 % mayor que la fibra de 38 mm. Reyes y Torres (2002) también trabajaron con dos tamaños de tiras plásticas, obteniendo que la tira de 20 x 4 mm presentaba valores más altos de resistencia a compresión y resistencia a flexión que la tira de 10 x 2 mm.

Respecto a la permeabilidad (Figura 4.9), se observa un claro efecto del tamaño de la fibra, puesto que, en ambas edades y dosis, la fibra de 60 x 3,5 mm presenta valores menores que la fibra de 40 x 1 mm. Por lo tanto, la fibra de menor tamaño presenta mejores resultados en permeabilidad. Kevern *et al.* (2014) obtuvo resultados similares respecto a permeabilidad e indicó que la adición de macrofibras sintéticas disminuye tanto la permeabilidad como la capacidad de infiltración y las disminuciones fueron más significativas en las dosis más altas de las fibras más largas.

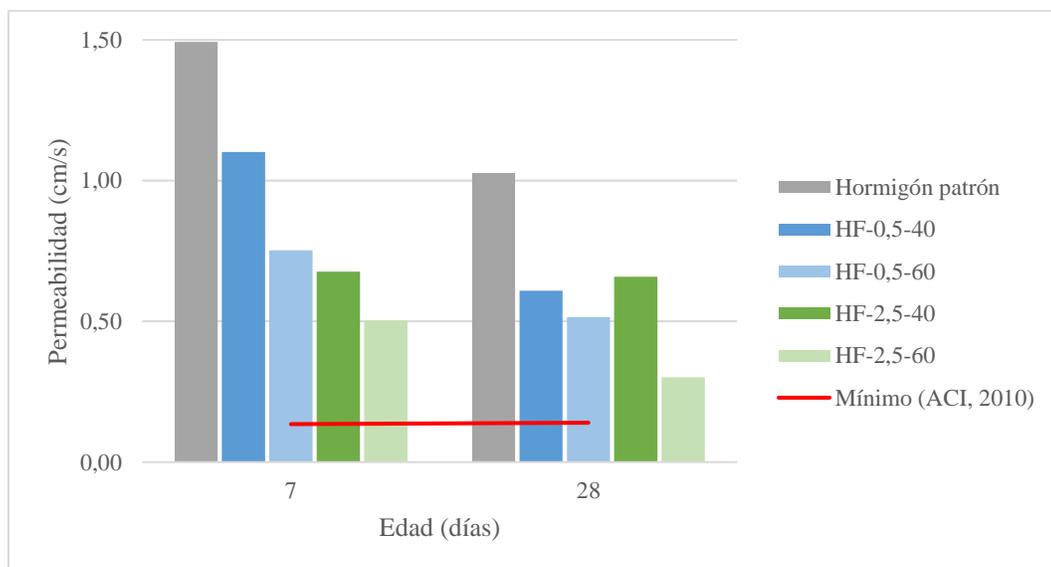


Figura 4.9 Comparación de permeabilidad de muestras de hormigón poroso con fibra a los 7 y 28 días

Al analizar la relación entre permeabilidad y resistencia a flexotracción, que son aquellas propiedades del hormigón permeable de mayor interés para su aplicación en pavimentos, la Figura 4.10 muestra una relación que tiende a ser lineal e inversa. Esta relación obtenida para hormigón poroso y hormigón poroso con fibra de plástico reciclado coincide con lo expuesto en el ACI (2010), donde se indica que, a medida que aumenta el contenido de aire disminuye la resistencia a flexotracción, y, por otro lado, el contenido de aire tiene una relación directa con la permeabilidad, por consecuencia, el aumento de la permeabilidad genera una disminución en la resistencia a flexotracción.

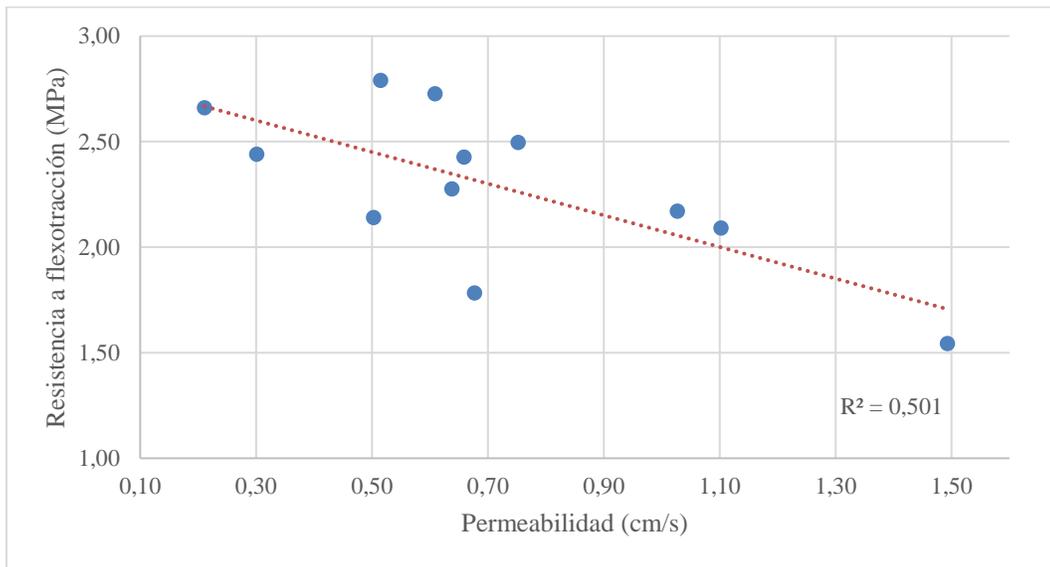


Figura 4.10 Relación entre permeabilidad y resistencia a flexotracción

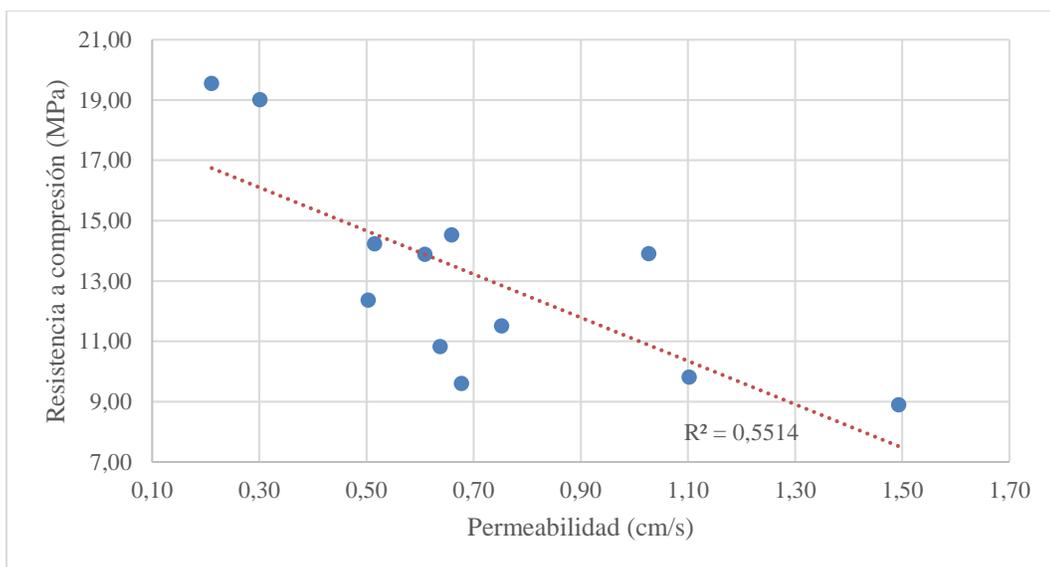


Figura 4.11 Relación entre permeabilidad y resistencia a compresión

La relación entre resistencia a compresión y permeabilidad es similar al caso de la resistencia a flexotracción, aunque con un coeficiente de determinación levemente mayor. Esta relación, presentada en la Figura 4.11 coincide con lo indicado por el ACI (2010) y Cires, F (2022).

4.6 Conclusión

A partir de los resultados expuestos en este capítulo se evidencia el efecto de la incorporación de fibra de plástico reciclado en las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso. Primero, respecto a la caracterización de la fibra de PET reciclado, es importante destacar que, a pesar de que los valores de resistencia son bastante menores a los que posee una fibra de polipropileno, es observable un efecto considerable en el hormigón poroso, presentándose como una fibra competitiva frente a la comercial. En cuanto al hormigón, los resultados de la docilidad presentaron leves diferencias respecto al hormigón patrón, las cuales fueron más notorias cuando se utilizó fibra de mayor tamaño. De todas maneras, los valores se encuentran dentro del rango establecido, siendo cercanos o iguales a cero. En cuanto a la resistencia a compresión, con la fibra de menor tamaño hubo una mejora leve respecto al patrón, pero con la fibra de 60 x 3,5 mm se obtuvo muy buenos resultados en las dosis más altas, teniéndose incrementos en la resistencia de hasta un 40,6 %. Respecto a la resistencia a flexotracción, la incorporación de fibra mejoró esta propiedad en todas las combinaciones, con porcentajes que varían desde 11,8 a 61,8 %, destacando altos valores de resistencia alcanzados a los 7 días con la fibra de mayor tamaño. Se observó que la fibra disminuyó la permeabilidad del hormigón, sin embargo, los valores se mantuvieron por sobre el mínimo establecido por el ACI (2010). Respecto al efecto del tamaño de la fibra, en general se evidenció que a mayor tamaño se obtiene resistencias mayores, tanto a compresión como flexotracción, y menores valores de permeabilidad. Esto es respaldado por las relaciones de resistencia y permeabilidad obtenidas, las cuales tienden a ser inversas y lineales.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

La incorporación de fibra de plástico reciclado modifica las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón poroso, mejorando la resistencia a flexotracción y compresión y disminuyendo la permeabilidad. En cuanto a la resistencia a flexotracción, la dosis de fibra más baja es aquella que presenta el mejor comportamiento en ambas etapas, alcanzándose un aumento del 28,6 % con la fibra de 60 x 3,5 mm y un 25,7 % con la fibra de 40 x 1 mm a los 28 días. Respecto a la resistencia a compresión, sólo con la fibra de mayor tamaño en las dosis más altas se obtuvo mejoras significativas, las cuales corresponden a un incremento respecto al patrón a los 28 días cercano al 40,0 %. Por último, la incorporación de fibra plástica disminuye la permeabilidad de las mezclas de hormigón poroso, teniéndose los menores valores con la fibra de mayor tamaño, sin embargo, los resultados obtenidos se encuentran por sobre el mínimo establecido por el ACI (2010).

Respecto a la fibra de PET reciclado, su caracterización permitió determinar la resistencia a tracción a rotura, la cual varía entre 36,5 y 98,3 MPa. Estos valores concuerdan con lo obtenido por Babafemi *et al.* (2018), aunque el rango es levemente superior. La existencia de un amplio rango de valores indica la presencia de una posible fuente de variabilidad en los resultados del hormigón poroso, por lo tanto, se recomienda en una futura investigación utilizar sólo un tipo o marca de botella PET, y medir su resistencia a tracción, esperando que los valores sean más homogéneos y de esta manera se reduzca esta fuente de variabilidad. Un punto importante por destacar es que a pesar de que la fibra reciclada tenga una resistencia a tracción bastante menor que la fibra de polipropileno, genera un efecto importante en los resultados de resistencia, similar a la fibra de polipropileno.

Respecto a las mezclas de hormigón poroso, en estado fresco, las mezclas con fibra de 40 x 1 mm no mostraron un efecto en la docilidad, puesto que las diferencias de los asentamientos respecto al hormigón patrón en general fueron de 0 y 0,5 cm, lo cual se considera insignificante. Respecto a las mezclas con fibra de 60 x 3,5 mm, se observó en la mayoría de los casos una diferencia de 1 cm, con asentamientos que en general fueron de 0 cm. No se observó un efecto de la dosis de fibra en la docilidad, por lo cual se puede afirmar que sólo el tamaño afecta levemente a esta propiedad. Todas las mezclas se encuentran dentro del rango establecido, presentando valores de asentamiento entre 0 y 1 cm.

Respecto a la resistencia a compresión, en ambas etapas se observó un aumento debido a la incorporación de fibra de plástico reciclado, pero sólo con la fibra de tamaño 60 x 3,5 mm hubo mejoras significativas, las cuales corresponden a un incremento del 40,6 % y 36,7 % en las dosis de 1,5 y 2,5 kg/m³, respectivamente. Contrario a lo expuesto en varias investigaciones, en este trabajo se obtuvo buenos resultados en cuanto a resistencia a la compresión, por lo cual la fibra de plástico reciclado se presenta como un material atractivo para mejorar esta propiedad.

En cuanto a la resistencia a flexotracción, todas las mezclas presentaron un aumento en la resistencia respecto al hormigón patrón, sin embargo, la dosis que presenta los valores más altos es 0,5 kg/m³, en ambos tamaños. Además, con esta dosis se alcanzó una resistencia a flexotracción de 2,79, lo cual es muy cercano a la exigencia de 2,80 MPa que establece el Servicio de Vivienda y Urbanización Metropolitano [SERVIU Metropolitano] (2006) para vías del tipo pasaje y local, por lo cual, luego de una optimización, podría utilizarse esta mezcla en la construcción de pavimentos permeables en Chile. Por otro lado, cabe destacar los altos valores de resistencia alcanzados a los 7 días con la fibra de mayor tamaño, los cuales fueron entre un 86 y 89 % de la resistencia medida a los 28 días. Esto representa una gran ventaja para este tipo de mezcla, puesto que el SERVIU Metropolitano (2006) indica que el pavimento puede ser entregado al tránsito cuando la resistencia de tracción por flexión sea igual o superior al 75 % de la resistencia característica específica, por lo tanto, un pavimento permeable elaborado con fibra de plástico reciclado podría ser abierto al tránsito a los 7 días.

La incorporación de fibra de plástico reciclado disminuye la permeabilidad del hormigón poroso, teniéndose que a mayor tamaño de fibra se obtienen menores valores de permeabilidad, sin embargo, los resultados obtenidos se mantienen por sobre el mínimo establecido en el ACI (2010), presentándose en el peor caso una permeabilidad de 0,21 cm/s, la cual corresponde a la mezcla con dosis de 1,5 kg/m³ y mayor tamaño de fibra. Además, se obtuvo relaciones entre resistencia a flexotracción y permeabilidad y resistencia a compresión y permeabilidad, las cuales tienden a ser inversas y lineales.

Respecto al tamaño de fibra óptimo, se recomienda 60 x 3,5 mm, ya que entrega los valores más altos de resistencia y una adecuada permeabilidad. Respecto a la dosis óptima, 0,5 y 1,5 kg/m³ son dosis competitivas puesto que con la primera se obtiene la resistencia a flexotracción más alta y con la segunda se obtiene la resistencia a compresión mayor, sin embargo, considerando la aplicación de la

mezcla de hormigón poroso en pavimentos permeables, se recomienda $0,5 \text{ kg/m}^3$, dado que además de tener una alta resistencia posee una adecuada permeabilidad.

Se observó un fenómeno distintivo en las viguetas de hormigón poroso con fibra. Al ensayarlas a flexotracción ocurría que estas no se separaban totalmente en dos partes, a diferencia de lo que ocurre con el hormigón sin fibra. La presencia de la fibra formaba un efecto puente el cual unía la grieta. Este efecto también fue observado por Lam y Yatim (2015), quienes indican que cuando se formó la grieta, la presencia de las fibras ayudó a unirla y se volvió más pequeña, lo que condujo a un modo de falla más dúctil, con mayor tenacidad y resistencia residual. De esta manera, dado que la tenacidad y la resistencia residual son parámetros importantes para evaluar el comportamiento de la fibra, se propone como línea de investigación la medición de estos parámetros, de tal forma que se evalúe el comportamiento después del *peak*.

Un aspecto por mejorar en la confección de hormigón poroso es el método de compactación, el cual tiene una alta dependencia del operador. Además, el método indica sólo la cantidad de capas y golpes a efectuar, por lo cual depende del operador la altura desde la cual deja caer la varilla pisón, la energía con la cual aplica el golpe y la homogeneidad con la cual se distribuye estos golpes en la superficie. El uso de varilla pisón generó oquedades en las probetas, lo cual pudo afectar los resultados de resistencia de manera negativa y en el caso de la permeabilidad, permitiendo que se obtuvieran valores más altos. Otro factor que podría mejorar los resultados obtenidos es el uso de aditivo superplastificante, el cual fue utilizado en la mayoría de la literatura. Elizondo *et al.* (2020) indica que estos aditivos pueden aumentar las propiedades mecánicas de las mezclas de hormigón poroso porque se reduce la relación de agua cemento de las mezclas. De esta manera, nacen distintas líneas de investigación enfocadas en la optimización de mezclas de hormigón poroso con fibra de plástico reciclado, de tal manera que se evalúe el efecto de mejorar el método de compactación y/o el uso de superplastificante en las propiedades mecánicas e hidráulicas del hormigón, esperando obtener resultados aún mejores que los actuales.

GLOSARIO

ACI	American Concrete Institute
AF	árido fino
AG	árido grueso
ASTM	American Society for Testing and Materials
A/C	relación agua cemento
CCF	fibra de acero revestida de cobre
ICPA	Instituto del Cemento Portland Argentino
INN	Instituto Nacional de Normalización
MINVU	Ministerio de Vivienda y Urbanismo
NCh	norma chilena
PE	polietileno
PET	tereftalato de polietileno
PP	polipropileno
PPF	fibra de polipropileno
PPTF	fibra de polipropileno gruesa
PS	poliestireno
PVC	policloruro de vinilo
R-PET	tereftalato de polietileno reciclado
SERVIU	Servicio de Vivienda y Urbanización
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency

REFERENCIAS

- American Concrete Institute. (2010). *Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10*. Committee 522, Technical Committee Document, ACI 522R-10.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (ASTM D638)*.
- Anandan, S. y Alsubig, M. (2021). Mechanical Strength Characterization of Plastic Fiber Reinforced Cement Concrete Composites. *Applied Sciences*, Vol. 11, p. 852.
- Araya, G., Maturana, P., Gómez, M., Carrasco, M., Antico, F. y Burbano, C. (2019). *Desempeño fracto-mecánico de morteros reforzados con fibras plásticas reforzadas*. 15° Congreso Internacional de Patología y Recuperación de Estructuras. Universidad Nacional de Salta. Argentina.
- Babafemi, A. J., Savija, B., Paul, S. C. y Anggraini, V. (2018). Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: a review. *Sustainability 2018*, Vol. 10, 3875.
- Beeldens, A., Van Gemert, D. y Caestecker, C. (2003). *Porous concrete: laboratory versus field experience*. Proceedings of 9th international symposium concrete roads, Istanbul, Turkey.
- Bonicelli, A., Martínez, G. y Fuentes, L. (2016). Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads. *Procedia Engineering*, Vol. 161, p. 1568-1573.
- Cárdenas, E., Albiter, A. y Jaimes, J. (2017). Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. *Ciencia ergo-sum*, Vol. 24-2, p. 173-180.
- Cires, F. (2022). *Propuesta de método de diseño de mezclas de hormigón poroso para pavimentos permeables*. [Memoria de Título, Universidad de Concepción].
- De Solminihac, H., Videla, C., Fernández, B. y Castro, J. (2007). Desarrollo de mezclas de hormigón poroso para pavimentos urbanos permeables. *Materiales de Construcción*, Vol. 57, 287, p. 23-36.
- Dhanani, G. y Bhimani, P. (2016). Effect of use plastic aggregates as partial replacement of natural aggregates in concrete with plastic fibres. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol.3.

- Elizondo, E., Andrés, V., Rodríguez, J. y Sangiorgi, C. (2020). Selection of Additives and Fibers for Improving the Mechanical and Safety Properties of Porous Concrete Pavement through Multi-Criteria Decision-Making Analysis. *Sustainability*, 2020, Vol. 12, 2392.
- Fernández, L., Vitola, L., y Salminci, P. (1998). *Estado del arte en el uso de Hormigones Porosos*. XII Congreso de Vialidad y Tránsito. Instituto del Cemento Portland Argentino.
- Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L. y Incarnato, L. (2011). Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*, Vol. 93, p. 2368-2374.
- Fraternali, F., Farina, I., Polzone, C., Pagliuca, E. y Feo, L. (2013). On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars. *Composites: Part B*, Vol. 46, p. 207-210.
- García, E. (2011). *Control de escorrentías urbanas mediante pavimentos permeables: aplicación en climas mediterráneos*. [Tesis de Maestría, Universitat Politècnica de València].
- Ghernouti, Y., Rabehi, B., Bouziani, T., Ghezraoui, H. y Makhloufi, A. (2015). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers (WFSCC). *Construction and Building Materials*, Vol. 82, p. 89-100.
- Haselbach, L., Boyer, M., Kevern, J. y Schaefer, V. (2011). Cyclic Heat Island Impacts on Traditional versus Pervious Concrete Pavement Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, D.C. No. 2240, p. 107-115.
- Haselbach, L., Poor, C. y Tilson, J. (2014). Dissolved zinc and copper retention from stormwater runoff in ordinary portland cement pervious concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 53, p. 652-657.
- Hidalgo, Y. (2017). *Evaluación de parámetros incidentes en la respuesta post agrietamiento del hormigón proyectado reforzado con fibras de polipropileno*. [Memoria de Título, Universidad de Chile].
- Instituto Nacional de Normalización. (1968). *Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales*. NCh 148. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009b). *Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento*. NCh 1017. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009a). *Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams*. NCh 1019. Santiago, Chile.

- Instituto Nacional de Normalización. (2009c). *Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. NCh 1037*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009d). *Hormigón – Ensayo de flexión por tracción. NCh 1038*. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización. (2012). *Hormigón y mortero – Agua de amasado – Clasificación y requisitos. NCh 1498*. Santiago, Chile.
- Kevern, J. T., ASCE, M., Biddle, D. y Cao, Q. S. M. ASCE. (2014). Effects of Macrosynthetic Fibers on Pervious Concrete Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Lam, T. F. y Yatim, J. M. (2015). Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete with different fiber content and fiber length. *Journal of Asian Concrete Federation*, Vol. 1, p. 11-21.
- Mercante, I., Alejandrino, C., Ojeda, J. P., Chini, J., Maroto, C. y Fajardo, N. (2018). Mortar and concrete composites with recycled plastic: A review. *Science and Technology of Materials*, Vol. 30, p. 69-79.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2017). *Manual de Elementos Urbanos Sustentables, Tomo II: Pavimentos y circulaciones, mobiliario urbano*. Santiago, Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2015). *Manual de la casa verde*. Gobierno de Chile.
- Nobili, N., Lanzoni, L. y Tarantino, A. M. (2013). Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. *Construction and Building Materials*, Vol. 47, p. 888-895.
- Neithalath, N., Sumanasooriya, M. S. y Deo, O. (2010). Characterizing pore volumen, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials Characterization*, Vol. 61, p. 802-813.
- Ochi, T., Okubo, S. y Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29, p. 448-455
- Ojeda, J., Mercante, I. y Fajardo, N. (2020). Diseño y ensayo de fibras plásticas recicladas para refuerzo de mortero. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 36, n. 1, p. 55-62.
- Pelisser, F., Klegues, O, Gleize, P. y Ramos, H. (2012). Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Materials Research*, 15(4), p. 679-686.
- Oviedo, I. (2021). *Informe de avance optimización de mezclas de hormigón poroso*. Laboratorio de hormigones, Universidad de Concepción. Chile.

- Pelisser, F., Klegues, O, Gleize, P. y Ramos, H. (2012). Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Materials Research*, 15(4), p. 679-686.
- Pereira de Oliveira, L. y Castro-Gomes, J. (2011). Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, p. 1712-1717.
- Rehder, B., Banh, K y Neithalath, N. (2014). Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 118, p. 1-16.
- Reyes, F. y Torres, A. (2002). Efecto de las fibras plásticas en la flexión de estructuras de pavimentos drenantes. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 17, n. 2, p. 93-102.
- S. E. Pils, P. Oliveira, F. Regoso, V. A. Paulon, M. F. Costella. (2019). Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fiber addiction. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, Vol. 12, n. 1, p. 101-121.
- Sandy, D., Tonapa, S. R., Tanan, B. y Febriani, L. (2017). Experimental Study of Porous Concrete with Addition of Fiber Variations. *International Journal of Engineering and Science Application*, Vol. 4.
- Servicio de Vivienda y Urbanización Metropolitano. (2006). *Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias*. Santiago, Chile.
- Seung, H. P., Dong, J. K., Gum, S. R. y Kyung, T. (2012). Tensile behaviour of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cement concrete composites*, Vol. 34, p. 172-184.
- Toghroli, A., Mehrabi, P., Shariati, M., Thoi, N., Jahandari, S. y Rasekh, H. (2020). Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers. *Construction and Building Materials*.
- U.S.EPA. (1990). *National water quality inventory-1988 report to Congress*. EPA 440-4-90- 003. Washington, D.C.
- Vivanco, E. (2019). *Generación y gestión de plástico en Chile, experiencia preliminar de la prohibición de bolsas plásticas*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Yang, W., Tang, Z., Wu, W., Zhang, K., Yuan, J., Li, H. y Feng, Z. (2022). Effect of different fibers on impermeability of steam cured recycled concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 328.
- Yin, S., Tuladhar, R., Madoc, S., Combe, M. y Collister, T. (2016). Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112 (Part 4), p. 2231-2242.

Zhu, H., Wen, C., Wang, Z. y Li, L. (2020). Study on the Permeability of Recycled Aggregate Pervious Concrete with Fibers. *Materials*, 2020, 13, 321.

ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

Esta memoria de título se vincula con el ODS Agua limpia y saneamiento dado que las metas 6.4 y 6.6 mencionan el uso eficiente de los recursos hídricos, asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua, además de proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, a lo cual podría aportar el uso de pavimento permeable mediante sus ventajas. También, se relaciona al ODS Ciudades y comunidades sostenibles, cuya problemática es la rápida urbanización, la cual está ejerciendo presión sobre los suministros de agua dulce, las aguas residuales, el entorno de vida y la salud pública. El uso de pavimento permeable permitiría abordar la meta 11.3 referida al aumento de la urbanización inclusiva y sostenible. Por último, existe un vínculo con el ODS Producción y consumo responsable, dado que el uso de este pavimento y de la fibra de plástico reciclado son alternativas para cumplir las metas 12.2 y 12.5, aportando a la gestión sostenible y el uso eficiente del agua, y la reducción de la generación de desechos plásticos mediante la reducción de fibra comercial y el reciclado de botellas PET.

ANEXO 4.1 RESULTADOS FIBRA DE PLÁSTICO RECICLADO

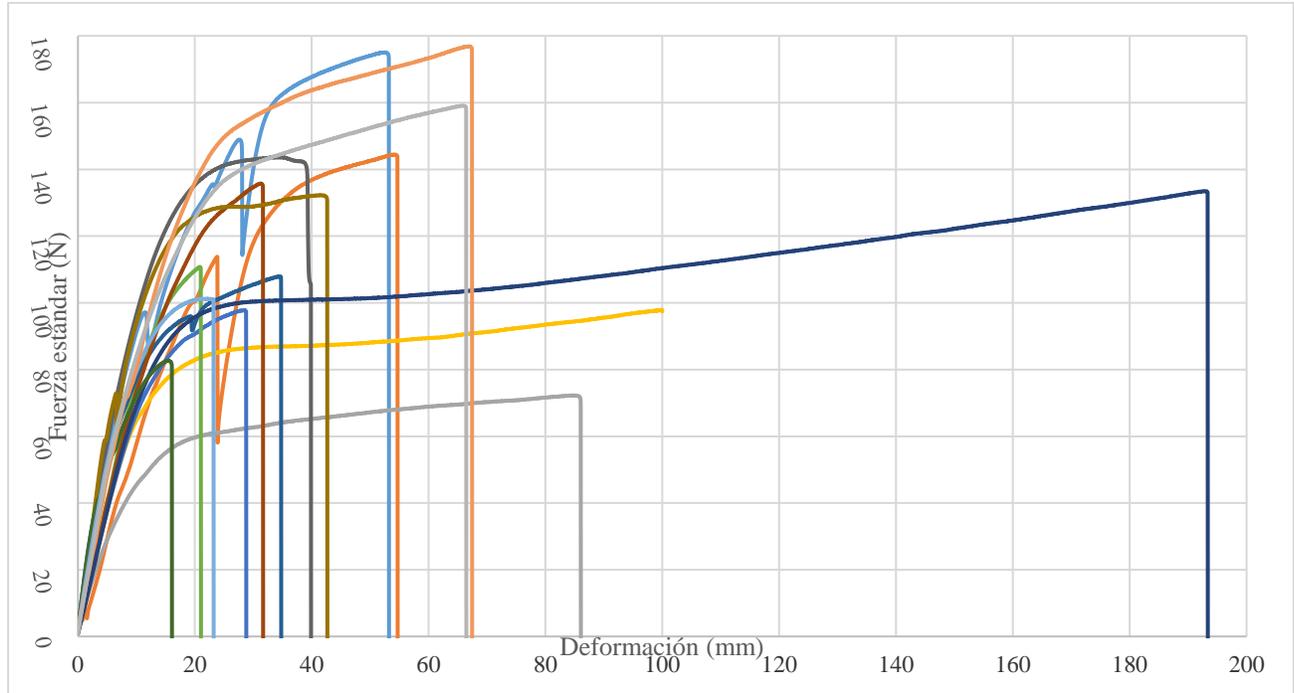


Figura A.1.1 Fuerza estándar versus deformación de pruebas de hilo de plástico reciclado

Tabla A.1.1 Resultados entregados por el ensayo de resistencia a tracción

Prueba	F _{max} (N)	dL en F _{max} (mm)	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)
1	175,07	52,51	0,70	4,50	3,15
2	144,45	54,23	0,50	3,30	1,65
3	72,24	84,81	0,60	3,30	1,98
4	97,88	99,97	0,50	3,40	1,70
5	97,78	28,45	0,60	2,70	1,62
6	110,76	20,88	0,50	3,00	1,50
7	107,91	34,49	0,50	3,00	1,50
8	135,74	31,28	0,60	3,10	1,86
9	143,62	34,45	0,60	4,80	2,88
10	132,25	41,69	0,50	3,40	1,70
11	133,46	192,91	0,60	3,60	2,16
12	82,69	15,46	0,60	3,60	2,16
13	101,18	22,04	0,50	3,60	1,80
14	176,90	66,87	0,50	3,50	1,80
15	159,09	65,97	0,50	3,60	1,80

Tabla A.1.2 Resultados de resistencia a tracción a la rotura (MPa)

Prueba	F_{max} (N)	Resistencia a tracción a la rotura (MPa)
3	72,2	36,5
4	97,9	57,6
5	97,8	60,4
6	110,8	73,8
8	135,7	73,0
9	143,6	49,9
11	133,5	61,8
12	82,7	38,3
13	101,2	56,2
14	176,9	98,3
15	159,1	88,4

ANEXO 4.2 RESULTADOS ETAPA 1

Tabla A.2.1 Resistencia a la compresión a los 7 días etapa 1

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
Hormigón patrón	C1-1	7,82
	C1-2	9,82
	C1-3	9,05
HF-0,5-40	C3-1	10,26
	C3-2	9,80
	C3-3	9,37
HF-2,5-40	C4-1	9,80
	C4-2	9,37
	C4-3	9,64

Tabla A.2.2 Resistencia a la compresión a los 28 días etapa 1

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
Hormigón patrón	C2-1	13,19
	C2-2	15,67
	C2-3	12,86
HF-0,5-40	C5-1	15,18
	C5-2	11,42
	C5-3	15,04
HF-2,5-40	C6-1	13,06
	C6-2	14,11
	C6-3	16,40

Tabla A.2.3 Resistencia a la flexotracción a los 7 días etapa 1

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
Hormigón patrón	C1-4	1,43
	C1-5	1,62
	C1-6	1,58
HF-0,5-40	C3-4	2,13
	C3-5	2,16
	C3-6	1,97
HF-2,5-40	C4-4	1,94
	C4-5	1,68
	C4-6	1,73

Tabla A.2.4 Resistencia a la flexotracción a los 28 días etapa 1

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
Hormigón patrón	C2-4	2,13
	C2-5	2,27
	C2-6	2,11
HF-0,5-40	C5-4	2,90
	C5-5	2,54
	C5-6	2,74
HF-2,5-40	C6-4	2,41
	C6-5	2,32
	C6-6	2,55

Tabla A.2.5 Permeabilidad a los 7 días etapa 1

Mezcla	Colada	Permeabilidad (cm/s)
Hormigón patrón	C1-1	1,46
	C1-2	1,48
	C1-3	1,55
HF-0,5-40	C3-1	1,06
	C3-2	1,13
	C3-3	1,11
HF-2,5-40	C4-1	0,68
	C4-2	0,66
	C4-3	0,70

Tabla A.2.6 Permeabilidad a los 28 días etapa 1

Mezcla	Colada	Permeabilidad (cm/s)
Hormigón patrón	C2-1	1,02
	C2-2	1,04
	C2-3	1,01
HF-0,5-40	C5-1	0,62
	C5-2	0,61
	C5-3	0,60
HF-2,5-40	C6-1	0,67
	C6-2	0,66
	C6-3	0,65

ANEXO 4.3 RESULTADOS ETAPA 2

Tabla A.3.1 Resistencia a la compresión a los 7 días etapa 2

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
HF-0,5-60	C10-1	12,86
	C10-2	11,42
	C10-3	10,26
HF-1,5-60	C11-1	11,30
	C11-2	11,66
	C11-3	9,50
HF-2,5-60	C12-1	12,50
	C12-2	12,57
	C12-3	12,01

Tabla A.3.2 Resistencia a la compresión a los 28 días etapa 2

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
HF-0,5-60	C7-1	14,42
	C7-2	13,63
	C7-3	14,64
HF-1,5-60	C8-1	18,03
	C8-2	18,94
	C8-3	21,68
HF-2,5-60	C9-1	19,09
	C9-2	17,81
	C9-3	20,14

Tabla A.3.3 Resistencia a la flexotracción a los 7 días etapa 2

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
HF-0,5-60	C10-4	2,36
	C10-5	2,63
	C10-6	2,50
HF-1,5-60	C11-4	2,07
	C11-5	2,48
	C11-6	2,28
HF-2,5-60	C12-4	2,06
	C12-5	2,23
	C12-6	2,14

Tabla A.3.4 Resistencia a la flexotracción a los 28 días etapa 2

Mezcla	Colada	Resistencia (MPa)
HF-0,5-60	C10-4	2,75
	C10-5	2,94
	C10-6	2,69
HF-1,5-60	C11-4	2,66
	C11-5	2,38
	C11-6	2,94
HF-2,5-60	C12-4	2,36
	C12-5	2,47
	C12-6	2,48

Tabla A.3.5 Permeabilidad a los 7 días etapa 2

Mezcla	Colada	Permeabilidad (cm/s)
HF-0,5-60	C10-1	0,74
	C10-2	0,77
	C10-3	0,75
HF-1,5-60	C11-1	0,65
	C11-2	0,62
	C11-3	0,64
HF-2,5-60	C12-1	0,50
	C12-2	0,50
	C12-3	0,51

Tabla A.3.6 Permeabilidad a los 28 días etapa 2

Mezcla	Colada	Permeabilidad (cm/s)
HF-0,5-60	C7-1	0,51
	C7-2	0,52
	C7-3	0,52
HF-1,5-60	C8-1	0,20
	C8-2	0,21
	C8-3	0,22
HF-2,5-60	C9-1	0,30
	C9-2	0,30
	C9-3	0,30

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Karina Beatriz Montecinos Arias
Título de la memoria : Evaluación del comportamiento mecánico e hidráulico de mezclas de hormigón poroso con fibras de plástico reciclado para utilización en pavimentos
Fecha de la presentación oral :
Profesor(es) Guía : Mauricio Pradena Miquel
Profesor(es) Revisor(es) : Oscar Link
Concepto :
Calificación :

Resumen

Ante problemáticas de las ciudades como la baja infiltración de agua lluvia hacia el subsuelo, grandes volúmenes de escorrentía y el fenómeno de isla de calor, surge como solución la utilización de pavimentos permeables. Sin embargo, estos poseen menores resistencias mecánicas que un pavimento tradicional. Una alternativa sustentable para mejorar su comportamiento mecánico y que permite valorizar un residuo, es el uso de fibra de plástico reciclado.

En esta investigación se confeccionó mezclas de hormigón poroso con fibra de plástico reciclado en tamaños 40 x 1 mm y 60 x 3,5 mm y dosis de 0, 0,5, 1,5 y 2,5 kg/m³. Los resultados demuestran que la incorporación de fibra de plástico reciclado mejora la resistencia a flexotracción y se obtiene buenos valores de resistencia a compresión con la fibra de mayor tamaño en las dosis más altas. La permeabilidad de las mezclas disminuye al agregar la fibra, sin embargo, los valores se encuentran por sobre el mínimo indicado en la literatura. El tamaño óptimo es 60 x 3,5 mm y la dosis óptima es 0,5 kg/m³, dado que se obtiene los valores más altos de resistencia a flexotracción con una adecuada permeabilidad.