



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL
REEMPLAZO DE REFUERZO DE ACERO POR FIBRAS PET
RECICLADAS EN LOSAS APOYADAS SOBRE TERRENO**

POR

Luis Alberto Maldonado Canales

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesora Guía:
Dra. Meylí Valin Fernández

Abril 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Luis Alberto Maldonado Canales

© 2025 Luis Alberto Maldonado Canales

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

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a mi profesora guía, la Doctora Meylí Valin, por su orientación y buena voluntad durante la realización de esta Memoria de Título.

Agradezco profundamente al jefe de carrera, Dr. Óscar Farías, por su disposición y respaldo, que fueron clave para dar cierre a este trabajo y culminar esta etapa.

Agradezco a mi padre y a mi madre.

Resumen

La industria de la construcción representa uno de los sectores más intensivos en el uso de recursos, con alta demanda de materiales como el hormigón y el acero, cuyos procesos productivos generan elevados impactos ambientales. La producción de cemento representa cerca del 8 % de las emisiones globales de CO₂, mientras que el acero requiere alta energía y presenta una fuerte dependencia de importación en países como Chile. En paralelo, la acumulación de residuos plásticos, especialmente PET, ha motivado su valorización como insumo en nuevos materiales. En este contexto, el uso de fibras recicladas de PET en hormigón aparece como una alternativa prometedora en términos técnicos, ambientales y económicos.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de usar PET reciclado como refuerzo en el hormigón, con énfasis en su viabilidad como sustituto del acero en losas apoyadas sobre terreno. Se analiza su efecto en la resistencia mecánica, el control de fisuración y el comportamiento postfisura, considerando su aplicación en elementos de baja exigencia estructural.

La metodología incluyó una revisión bibliográfica del estado del arte, un análisis estadístico de resultados experimentales, y la evaluación de criterios normativos aplicables. Se desarrolló un diseño comparativo de losas con malla de acero y con fibras R-PET, seguido de un análisis económico y ambiental con enfoque de ciclo de vida adaptado al contexto chileno.

Los resultados indican que, en promedio, con una dosificación del 1 % en volumen y fibras de entre 30 y 50 mm de longitud, se logra un buen equilibrio de propiedades en el hormigón, manteniendo su resistencia a compresión y trabajabilidad, y permitiendo mejorar la resistencia a flexión, el control de fisuración y la tenacidad. Sin embargo, para reemplazar una malla de uso convencional en losas apoyadas sobre terreno, se determinó que una dosificación de solo 0,24 % en volumen sería suficiente. Aunque este volumen es inferior a lo estimado como óptimo, resultaría adecuada para aportar resistencia postfisura y control de agrietamiento en aplicaciones de baja exigencia estructural, donde el hormigón ya cumple por sí solo con la resistencia base requerida.

El diseño con fibras PET mostró una reducción de hasta un 24 % en el costo por metro cuadrado de superficie de losa, así como una disminución de aproximadamente un 12 % en las emisiones de CO₂e por unidad de superficie, en comparación con el uso de refuerzo con malla electrosoldada.

Se concluye que las fibras recicladas de PET constituyen una alternativa viable para sustituir parcialmente el acero en losas apoyadas, especialmente en aplicaciones de baja exigencia. Esta solución permite valorizar residuos plásticos, reducir costos y avanzar hacia una construcción más sostenible.

Abstract

The construction industry is one of the most resource-intensive sectors, with high demand for materials such as concrete and steel, whose production processes generate significant environmental impacts. Cement production accounts for approximately 8% of global CO₂ emissions, while steel requires high energy input and presents strong import dependency in countries like Chile. In parallel, the accumulation of plastic waste—particularly PET—has driven its valorization as a raw material in the development of new construction products. In this context, the use of recycled PET fibers in concrete emerges as a promising alternative from technical, environmental, and economic perspectives.

This study aims to assess the technical, economic, and environmental feasibility of using recycled PET as reinforcement in concrete, with emphasis on its viability as a substitute for steel in ground-supported slabs. Its effects on mechanical strength, crack control, and post-cracking behavior are analyzed, considering its application in elements with low structural demands.

The methodology included a state-of-the-art literature review, a statistical analysis of experimental results, and an evaluation of relevant design standards. A comparative slab design was developed using welded wire mesh and R-PET fibers, followed by an economic and environmental life cycle analysis adapted to the Chilean context.

The results indicate that, on average, a dosage of 1% by volume with fiber lengths between 30 and 50 mm achieves a good balance of concrete properties, maintaining compressive strength and workability while improving flexural strength, crack control, and toughness. However, to replace conventional mesh in ground-supported slabs, a dosage of only 0.24% by volume was found to be sufficient. Although this volume is lower than the optimal dosage estimated in the literature, it would still be adequate to provide post-cracking resistance and crack control in low-demand structural applications, where concrete alone already meets the basic strength requirements.

The PET fiber-reinforced slab design showed a reduction of up to 24% in cost per square meter of slab surface, as well as an approximate 12% decrease in CO_{2e} emissions per unit area, compared to slabs reinforced with welded wire mesh.

It is concluded that recycled PET fibers are a viable alternative to partially replace steel in ground-supported slabs, particularly in low-demand applications. This solution allows for the valorization of plastic waste, cost reduction, and progress toward more sustainable construction practices.

Índice de Contenido

Lista de Figuras	v
Lista de Tablas	vii
Glosario	viii
CAPÍTULO 1 Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Principal	3
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Hipótesis	4
1.4 Metodología de trabajo.....	4
CAPÍTULO 2 Marco teórico: Hormigón reforzado con fibras	6
2.1 Hormigón.....	6
2.1.1 Cemento	6
2.1.2 Áridos	7
2.1.3 Agua	8
2.2 Hormigón reforzado con fibras.....	8
2.2.1 Fibras de refuerzo.....	8
2.3 Fundamentos del refuerzo con fibras.....	9
2.4 Caracterización del hormigón reforzado con fibras	11
2.4.1 Docilidad	11
2.4.2 Resistencia a la compresión	12
2.4.3 Resistencia a la tracción	13
2.4.4 Resistencia a la flexión.....	13
2.5 Fenómeno de agrietamiento en el hormigón	14
2.5.1 Contracción plástica	14
2.5.2 Contracción por secado	15
CAPÍTULO 3 Estado del arte: Fibras de R-PET en el hormigón	16
3.1 Fibras de PET recicladas en mezclas de hormigón	16
3.2 Efecto de las fibras R-PET en la resistencia mecánica del hormigón	16

3.2.1	Efecto de la geometría de las fibras de R-PET en el hormigón	21
3.3	Efecto sobre la docilidad de la mezcla	25
3.4	Efecto en la contracción plástica y por secado	27
3.5	Otras características estudiadas	29
CAPÍTULO 4	Discusión: Fibras R-PET en el hormigón.....	30
4.1	Resumen de casos de estudio.....	30
4.1.1	Tendencias en la resistencia del hormigón con respecto al volumen de fibras R-PET..	31
4.1.2	Tendencias en la resistencia del hormigón con respecto a la longitud de fibras R-PET	34
CAPÍTULO 5	Losas apoyadas sobre terreno reforzadas con fibras	36
5.1	Losas apoyadas sobre terreno	36
5.2	Losas reforzadas con fibras	36
5.3	Conceptos de diseño con hormigón reforzado con fibras.....	39
5.4	Diseño con refuerzo tradicional y posibilidad de reemplazo	41
CAPÍTULO 6	Propuesta de diseño	44
6.1	Diseño de mezcla de hormigón	44
6.2	Caso 1: Losa reforzada con malla de acero	45
6.3	Caso 2: Losa reforzada con fibras R-PET	45
CAPÍTULO 7	Análisis económico y de impacto ambiental	48
7.1	Incidencia económica y ambiental del sector de la construcción y necesidad de alternativas sostenibles	48
7.2	Reciclaje y valorización del PET en Chile	49
7.3	Costos de fabricación.....	50
7.4	Análisis de ciclo de vida.....	53
CAPÍTULO 8	Conclusiones.....	56
Referencias	58
Anexo A	: Resumen resultados de la resistencia mecánica del hormigón reforzado con fibras PET reciclado de estudios revisados	63
Anexo B	: Costos unitarios.....	67
Anexo C	: Parámetros de Evaluación Ambiental: Energía Incorporada y Emisiones de CO ₂	68

Lista de Figuras

Figura 2.1: Evolución de la resistencia mecánica (compresión) en el proceso de endurecimiento del hormigón causado por el fraguado del cemento.....	7
Figura 2.2: Mecanismos de acción y modos de falla asociados en hormigón reforzado con fibras. .	10
Figura 2.3: Curva esfuerzo - deformación resultante tras prueba de deflexión en HRF.....	10
Figura 2.4: Determinación del asentamiento del hormigón mediante ensayo de cono de Abrams. ..	12
Figura 2.5: Probeta de hormigón en dispositivo de carga de flexión.....	13
Figura 2.6: Contracción por secado en losas y formación de fisuras por restricción de la superficie.	15
Figura 3.1: Evolución de la resistencia a compresión del hormigón con diferentes contenidos de fibras PET recicladas a los 7, 14 y 28 días.....	17
Figura 3.2: Esfuerzo de tracción por hendidura de HRF vs volumen de fibras en dos configuraciones de relaciones de aspecto en fibra PET de 25 mm.....	18
Figura 3.3: Energía absorbida post-fisura en HRF con diferentes longitudes y dosificaciones de fibras R-PET.....	19
Figura 3.4: (a) Configuración de colapso de una viga con fibras PET en ensayo de flexión. (b) Detalle del efecto de puente de las fibras sobre la grieta.	20
Figura 3.5: Tres configuraciones geométricas de fibras de PET. (a) Rectas; (b) Onduladas; (c) Con relieve.	22
Figura 3.6: (a) Ensayo de extracción (pullout test) de fibras PET. (b) Resistencia de unión mecánica para los tres tipos de fibras PET ensayadas.....	22
Figura 3.7: Geometrías de fibras R-PET ensayadas: a) Recta, b) Extremos aplanados, c) Hoja de sierra, d) Extremos rizados (dimensiones en mm).	23
Figura 3.8: Curvas carga–desplazamiento ensayo de flexión para especímenes con fibras PET mostradas en Figura 3.7.	23
Figura 3.9: (a) Geometría de la fibra PET en forma de “O”. (b) Ruptura localizada en esquina de espécimen cúbico, mostrando retención parcial del hormigón por la fibra. (c) Anclaje interno de fibras en zona de tracción durante ensayo cilíndrico, con evidencia de buena adherencia.....	24
Figura 3.10: Curvas carga-deformación de hormigones con incorporación de fibras PET circulares en proporciones de 0,5 %, 0,75 % y 1 % en peso.	25
Figura 3.11: Medidas de asentamiento de mezclas de hormigón reforzadas con fibras R-PET en diferentes dosificaciones y relaciones de aspecto.	26
Figura 3.12: Reducción de área agrietada por contracción plástica en función del contenido y geometría de fibras PET recicladas.....	27
Figura 3.13: Patrones de agrietamiento por contracción plástica en paneles de mortero reforzados con fibras PET con relieve, en varias fracciones volumétricas: (a) Control, (b) 0,1%, (c) 0,25%, (d) 0,5%, (e) 0,75%, (f) 1,00%.	28
Figura 4.1: Distribución de ensayos por volumen de fibras de refuerzo.....	30
Figura 4.2: Gráfica dispersión de datos cambio resistencia compresión vs volumen de fibras.....	31

Figura 4.3: Tendencia variación resistencia a compresión (rango $\pm 15\%$.) vs volumen de fibra PET.	32
Figura 4.4: Gráfica dispersión de datos cambio resistencia flexión vs volumen de fibras.	32
Figura 4.5: Tendencia variación resistencia flexión (rango -20% a 30% .) vs volumen de fibra PET.	33
Figura 4.6: Tendencia resistencia compresión vs longitud fibra PET (0,5% - 1,5% volumen).	34
Figura 4.7: Tendencia resistencia flexión vs longitud fibra PET (0,5% - 1,5% volumen).	34
Figura 5.1: Prueba de carga concentrada en losa apoyada sobre terreno.	37
Figura 5.2: Curvas carga–deflexión de losas apoyadas con diferentes tipos de refuerzo.	37
Figura 5.3: (a) Configuración ensayo de carga puntual sobre paneles de hormigón armado reforzados con fibras PET recicladas. (b) Curvas carga–deflexión.	38
Figura 5.4: Esquema del bloque de esfuerzos en un elemento de HRF fisurado en flexión. (a) Sección de viga HRF; (b) Distribución real de esfuerzos normales; (c) Distribución simplificada de esfuerzos normales.	39
Figura 5.5: Curva carga – deflexión típica de ensayo de flexión en viga prismática según ASTM C1609.	40
Figura 5.6: Modelo de losa con apoyo continuo sometida a una carga puntual centrada.	41
Figura 5.7: Esquema del bloque de esfuerzos en un elemento de hormigón armado fisurado en flexión sin fibras. (a) Sección de viga de hormigón armado; (b) Distribución real de esfuerzos normales; c) Distribución simplificada de los esfuerzos normales.	42
Figura 7.1: Resumen impacto ambiental del sector de la construcción en Chile.	48
Figura 7.2: Costo estimado de losas con refuerzo tradicional y alternativo (R-PET).	52
Figura 7.3: Distribución porcentual de los costos por ítem en losas reforzadas: (a) Malla acero, (b) Fibras PET.	52
Figura 7.4: Comparación de emisiones de CO ₂ e entre losa reforzada con malla de acero y fibras R- PET.	55
Figura 7.5: Distribución porcentual de la huella de carbono en etapa de extracción y procesamiento según material para losa reforzada con fibras R-PET.	55

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Relación entre medida de asentamiento en cono de Abrams y tipo de consistencia del hormigón.	12
Tabla 3.1: Propiedades físicas y mecánicas típicas de las fibras recicladas de PET.....	16
Tabla 4.1: Parámetros óptimos estimados de volumen y longitud de fibra PET según tipo de sollicitación mecánica.	35
Tabla 5.1: Clasificación del nivel de refuerzo en losas de hormigón según la cuantía de acero ρ	43
Tabla 6.1: Características de diseño losa de hormigón.	44
Tabla 6.2: Proporciones de materiales del diseño de mezcla de hormigón.....	45
Tabla 6.3: Características geométricas de las fibras R-PET seleccionadas.	47
Tabla 7.1: Costos de fabricación total y por metro cuadrado de losa según tipo de refuerzo.....	51
Tabla 7.2: Huella de carbono y demanda energética por material (etapas de extracción y procesamiento).	54
Tabla 7.3: Huella de carbono y demanda energética totales para fabricación losas.	54
Tabla A.1: Resultados de la resistencia de compresión y flexión de especímenes de hormigón reforzado con fibras PET reciclado, después de 28 días de curado según diferentes investigaciones.	63
Tabla B.1: Precios referenciales unitarios de insumos de fabricación hormigón (CLP).	67
Tabla B.2: Precios referenciales unitarios de insumos asociados al refuerzo (CLP).	67
Tabla B.3: Estimación del costo por kilogramo de fibra PET reciclada (CLP).	67
Tabla C.1: Factores de energía y emisión por insumo.	68
Tabla C.2: Factores de emisión de gases de efecto invernadero según tipo de fuente de energía.	68

Glosario

Notación	Significado
ACI	American Concrete Institute
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CLP	Pesos Chilenos
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
HH	Hombre - hora
HRF	Hormigón reforzado con fibras
NCh	Norma Chilena
PET	Tereftalato de Polietileno
PIB	Producto Interno Bruto
R-PET	PET reciclado
A_s	Área de sección transversal acero por metro lineal
D_{os}	Dosificación fibras
E	Módulo de elasticidad
f_c	Esfuerzo de compresión
f_r	Esfuerzo de flexión
f_y	Resistencia de fluencia del acero
$f_{e,3}$	Resistencia equivalente a flexión
γ_f	Densidad material de fibra
L_f	Longitud de fibra
R^2	Coefficiente de determinación
$R_{e,3}$	Relación de resistencia residual equivalente
ρ	Cuantía de acero
V_f	Fracción volumétrica de fibras

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

Los materiales de construcción basados en cemento son los más empleados a nivel mundial, debido a su resistencia, durabilidad y bajo costo de fabricación. Entre ellos destaca el hormigón, una mezcla compuesta por agua, cemento y áridos. Este material presenta una notable resistencia a la compresión, aunque muestra un bajo desempeño frente a esfuerzos de tracción y es propenso al agrietamiento. Para contrarrestar estas debilidades, se recurre comúnmente al uso de refuerzos, siendo el acero el más tradicional, aunque también se ha explorado la incorporación de fibras de diversos materiales, tales como nylon, polipropileno o aramida.

El hormigón también representa un desafío ambiental, especialmente por el impacto asociado a la producción de cemento, uno de sus principales componentes. La industria cementera es responsable de aproximadamente el 8 % de las emisiones globales de CO₂ de origen antrópico [1], principalmente debido al proceso de calcinación del clínker, etapa fundamental en su fabricación y altamente demandante en energía. Frente a este escenario, la Asociación Mundial del Cemento y el Hormigón (GCCA) ha impulsado estrategias orientadas a alcanzar la carbono-neutralidad al año 2050, destacándose entre ellas la reducción del contenido de clínker en el cemento. En línea con estos esfuerzos, la industria chilena suscribió en 2023 la Hoja de Ruta Cemento y Hormigón 2050 [2], documento que establece una meta de reducción del 30% en las emisiones netas del sector para el año 2030, y alcanzar la neutralidad en carbono a mediados de siglo.

El acero, por su parte, también es un material con alto costo energético y ambiental, cuya producción genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero y residuos tóxicos. En países como Chile, su dependencia casi total de la importación lo convierte en un insumo sensible a la volatilidad de precios internacionales, influida por factores como la demanda global, políticas arancelarias y precios de materias primas. Esta inestabilidad afecta la sostenibilidad de su uso en ciertas aplicaciones. Además, la energía incorporada en barras de acero de refuerzo en Chile alcanza los 18,9 MJ/kg —valor que representa la energía total necesaria para su extracción, procesamiento, fabricación y transporte—, siendo una de las más altas entre los materiales de construcción más utilizados [3]. A esto se suma su propensión a la corrosión, uno de los principales factores de deterioro en estructuras de hormigón armado [4].

Paralelamente, el uso masivo de plásticos ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, impulsado por su bajo costo y versatilidad en múltiples aplicaciones. Este fenómeno ha contribuido significativamente al desarrollo industrial y al aumento de la calidad de vida, pero también ha derivado en una crisis ambiental de gran escala. Se estima que entre 1950 y 2018 se produjeron más de 9.200 millones de toneladas de plásticos, de las cuales cerca de 6.300 millones terminaron como residuos [5]. De estos, apenas un 9 % fue reciclado, mientras que el resto fue incinerado o depositado en vertederos y en el medio ambiente. Estos desechos han provocado una grave contaminación en océanos y ríos, destacándose especialmente la degradación del plástico en micropartículas conocidas como microplásticos, que ya han sido detectadas en cadenas tróficas y fuentes de agua. Revisiones recientes indican, además, que la tasa promedio mundial de reciclaje de plásticos no supera el 8,8%, lo que evidencia las limitaciones de los sistemas actuales de gestión de residuos plásticos [6]. De continuar esta tendencia, para el año 2050 se proyecta que se proyecta que para el año 2050 se habrán acumulado cerca de doce mil millones de toneladas en ecosistemas terrestres y marinos [7].

Uno de los plásticos más utilizados a nivel global es el polietileno tereftalato (PET), un polímero termoplástico derivado del petróleo. Su ligereza, resistencia química y mecánica, junto con su transparencia y brillo, lo han convertido en un material ampliamente empleado en la fabricación de botellas y envases de un solo uso, que hoy en día figuran entre los desechos más comunes en entornos urbanos, ríos y playas. Su alta cristalinidad y la naturaleza de sus moléculas lo hacen resistente a la degradación natural, estimándose un tiempo de descomposición de hasta 600 años. En 2022, su producción mundial alcanzó los 25,47 millones de toneladas, cifra que continúa aumentando debido a la creciente demanda global [8].

En este contexto, se ha explorado el uso de estos residuos como materia prima en la elaboración de nuevos materiales, con el fin de mitigar su impacto ambiental. En particular, el aprovechamiento del PET reciclado en la industria de la construcción ha despertado un interés creciente. Diversos estudios han propuesto su incorporación en mezclas de hormigón y mortero, ya sea añadiéndose de manera directa como material triturado o granulado para sustituir el agregado fino [9], o bien en forma de micro y macrofibras que actúan como refuerzo dentro de la matriz cementicia [10]. Estas soluciones no solo permiten valorizar un residuo de difícil degradación, sino que también abren nuevas posibilidades en el desarrollo de materiales más sostenibles.

La incorporación de fibras de PET en el hormigón ha sido objeto de múltiples investigaciones orientadas a evaluar su efecto sobre las propiedades mecánicas del material. Estas han demostrado que la inclusión de fibras de PET reciclado puede mejorar propiedades como la tenacidad, contribuir al control de fisuras y aumentar la resistencia post-agrietamiento. El efecto puente generado por las fibras permite limitar la apertura de grietas y controlar su propagación, favoreciendo la disipación de energía bajo cargas aplicadas [11]. Además, el uso de PET puede reducir la densidad del hormigón y modificar propiedades como la aislación térmica y la porosidad, lo que resulta útil en aplicaciones no estructurales o en soluciones permeables como los hormigones porosos.

Se han reportado casos de éxito en aplicaciones constructivas que incorporan fibras de PET como refuerzo, tales como el revestimiento de túneles [12], o el reemplazo de jaulas de acero en ductos de hormigón armado, aportando con mejoras en el control de fisuración, reducción del peso estructural de hasta un 15 % y una disminución de los costos de fabricación del 20 % por tramo de ducto [13].

Las losas de hormigón apoyadas directamente sobre el terreno representan una aplicación con alto potencial para el uso de fibras recicladas de PET como refuerzo. Estos elementos, comunes en pavimentos, aceras, estacionamientos y otras superficies de uso liviano, descansan sobre un apoyo continuo proporcionado por el suelo y, por tanto, no están sometidos a grandes solicitaciones estructurales (en contextos de baja exigencia); sin embargo, son particularmente susceptibles a la fisuración provocada por retracción plástica, contracción térmica o asentamientos diferenciales, especialmente en ambientes cálidos o con alta tasa de evaporación. Para ello, se emplean tradicionalmente mallas electrosoldadas, utilizadas para limitar la formación y apertura de grietas. No obstante, su incorporación implica un consumo importante de acero y la necesidad de recursos adicionales asociados a su manipulación e instalación [14].

En este trabajo se presenta, en primer lugar, una revisión general de las propiedades del hormigón con incorporación de fibras recicladas de PET, abarcando su comportamiento en estado fresco y endurecido, con énfasis en la resistencia mecánica, la docilidad, el control de fisuración y el desempeño postfisura. Posteriormente, a partir de datos experimentales reportados en la literatura especializada, se realiza un análisis más detallado de la influencia de variables como la dosificación, geometría, centrado en la resistencia a compresión y flexión, con el fin de identificar tendencias según tipo, volumen y geometría de las fibras utilizadas. A continuación, se desarrolla una aproximación al diseño de losas de hormigón apoyadas sobre terreno, incorporando fibras recicladas de PET como refuerzo, con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica como alternativa al uso de mallas de acero. Para ello, se consideran criterios normativos como referencia metodológica dentro del análisis comparativo. Finalmente, se lleva a cabo una evaluación económica y un análisis de ciclo de vida (ACV), comparando esta alternativa con el refuerzo convencional, con énfasis en su impacto ambiental y viabilidad en el contexto constructivo chileno.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

Evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de incorporar fibras de PET reciclado en hormigón, con especial énfasis en su potencial como sustituto del refuerzo de malla de acero en losas apoyadas sobre terreno.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos planteados para el desarrollo del trabajo son los siguientes:

- OE1: Revisar el estado actual del conocimiento sobre el comportamiento mecánico del hormigón con incorporación de fibras de PET reciclado, abarcando su comportamiento en estado fresco y endurecido.
- OE2: Analizar tendencias en los resultados de resistencia a compresión y flexión, a partir de datos experimentales reportados en la literatura, considerando variables como la dosificación y geometría de las fibras.
- OE3: Revisar criterios de diseño estructural aplicables al hormigón reforzado con fibras, utilizando referencias normativas vigentes, con el fin de establecer lineamientos para la incorporación de fibras recicladas de PET en losas apoyadas sobre terreno.
- OE4: Estimar una dosificación de fibras PET que proporcione un desempeño equivalente al nivel de refuerzo de una malla de acero convencional, para controlar efectos de contracción en términos de control de fisuración.
- OE5: Evaluar el impacto económico y ambiental del uso de fibras recicladas de PET como refuerzo en losas de hormigón apoyadas, mediante un análisis comparativo frente al uso de mallas de acero, considerando los costos asociados y las emisiones de CO₂ a través de un enfoque de análisis de ciclo de vida (ACV), en el contexto constructivo chileno.

1.3 Hipótesis

El hormigón reforzado con fibras PET recicladas puede presentar un desempeño mecánico adecuado para sustituir parcial o totalmente el refuerzo de acero en losas apoyadas sobre terreno, generando además ventajas económicas y reduciendo el impacto ambiental asociado al uso de acero y a la disposición de residuos plásticos.

1.4 Metodología de trabajo

OE1: Revisión bibliográfica

Se realizará una búsqueda sistemática en bases de datos científicas especializadas (ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, etc.) utilizando palabras clave como “PET fiber reinforced concrete”, “recycled PET fibers”, “Effects of the geometry of recycled PET fibers”, “fresh and hardened concrete”, entre otras. La selección priorizará publicaciones recientes con énfasis en artículos

científicos, tesis y reportes técnicos relevantes. Se sistematizarán y analizarán las características, resultados y conclusiones obtenidas por los diferentes autores, clasificando los resultados según las propiedades del hormigón en estado fresco (trabajabilidad, consistencia) y endurecido (resistencia, fisuración, durabilidad).

OE2: Análisis estadístico y de tendencias

Se recopilarán datos experimentales sobre resistencia a compresión y flexión reportados en la literatura seleccionada anteriormente. El análisis considerará variables claves como dosis volumétricas de fibras, longitud y geometría de las fibras de PET reciclado utilizadas. Los resultados serán examinados mediante gráficos comparativos y análisis de tendencias utilizando correlaciones cualitativas y cuantitativas simples (regresión lineal), con el fin de identificar relaciones significativas y posibles dosis óptimas de fibras.

OE3-OE4: Revisión normativa y propuesta de criterios de diseño

Se realizará una revisión normativa específica sobre criterios de diseño estructural para elementos de hormigón reforzado con fibras, enfocada principalmente en losas apoyadas sobre terreno, tomando como referencia estándares técnicos internacionales como ACI 544.4R, ACI 360R-10, y documentos técnicos específicos sobre fibras sintéticas y metálicas. A partir de esta base, se adoptará un enfoque de equivalencia funcional entre el refuerzo tradicional de acero y las fibras recicladas de PET, considerando cuantías mínimas recomendadas para el control de fisuración por contracción. La dosificación de fibras recicladas de PET se estima mediante una correlación empírica obtenida de resultados experimentales de ensayos reportados en la literatura.

OE5: Análisis económico y evaluación ambiental

Se realizará un análisis comparativo de costos considerando los precios unitarios de materiales, costos de fabricación y mano de obra asociada a la construcción de una losa tipo de hormigón reforzado con fibras PET versus refuerzo tradicional con mallas metálicas. Para la evaluación ambiental, se aplica un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con enfoque *cradle-to-gate*, considerando las etapas de extracción de materias primas, procesamiento, transporte y construcción. Se estiman las emisiones de CO₂ equivalente y el consumo energético total para ambos tipos de refuerzo, utilizando factores de emisión provenientes de bases de datos internacionales (ICE, Ecoinvent) y fuentes locales chilenas. Los resultados serán presentados mediante gráficos comparativos destacando las alternativas con menor impacto ambiental y costos asociados.

CAPÍTULO 2

Marco teórico: Hormigón reforzado con fibras

2.1 Hormigón

De acuerdo al American Concrete Institute (ACI), el hormigón se define como una mezcla homogénea producto de la unión de cemento, agregados y agua [15]. Esta mezcla puede incorporar, además, aditivos, fibras u otros materiales cementicios suplementarios, según el uso previsto. Gracias a su versatilidad, buena resistencia y durabilidad, el hormigón se ha consolidado como uno de los materiales más utilizados en la construcción. A esto se suma que las materias primas necesarias para su elaboración se encuentran ampliamente disponibles y de costo relativamente bajo.

Las características finales de un hormigón dependen íntimamente de su composición y de las proporciones en que los elementos que lo constituyen son mezclados, razón por la cual, a continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

2.1.1 Cemento

El cemento es el material aglutinante capaz de proporcionar cohesión a los demás componentes de la mezcla mediante el efecto de transformaciones químicas en su composición. Al mezclarse con una cantidad determinada de agua, se forma una masa plástica que inicialmente es moldeable pero que va aumentando en viscosidad y después de un determinado tiempo de fraguado, esta masa pasa a volverse rígida.

El fraguado, que puede durar entre 45 minutos y 10 horas según el tipo de cemento y las condiciones ambientales, marca el inicio del desarrollo de resistencia. Durante este proceso se forman compuestos hidratados, principalmente cristales de silicato cálcico hidratado (C-S-H) y otros productos secundarios, que endurecen la mezcla.

Posteriormente, el cemento entra en una fase de endurecimiento prolongada, en la que continúa ganando resistencia a medida que avanzan las reacciones de hidratación. Como se observa en la Figura 2.1, tras 28 días de curado en condiciones controladas de temperatura y humedad, el hormigón alcanza su resistencia a compresión característica, aunque el proceso de hidratación puede continuar incluso por meses.

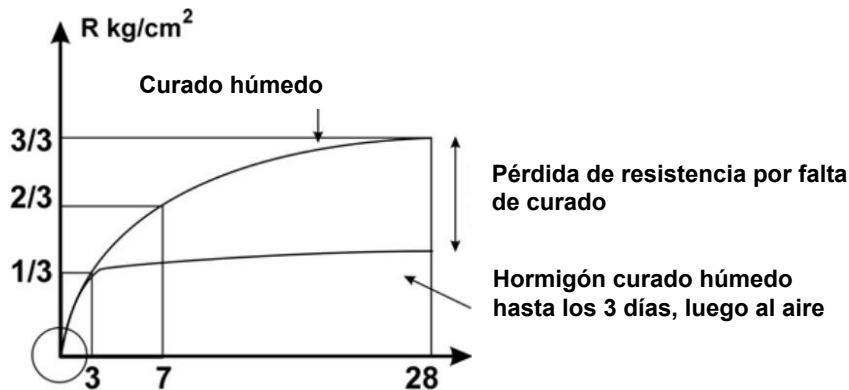


Figura 2.1: Evolución de la resistencia mecánica (compresión) en el proceso de endurecimiento del hormigón causado por el fraguado del cemento [16].

2.1.2 Áridos

Los áridos son materiales granulares inorgánicos de carácter pedregoso que, aunque no interactúa químicamente dentro de la mezcla, constituyen un componente fundamental ya que conforma la mayor parte de su volumen, siendo la proporción de áridos normalmente definida en torno a un 70% de la composición del hormigón.

Según la norma técnica chilena NCh163 [17], los áridos se clasifican en función de su granulometría, es decir, la distribución porcentual en masa seca de los distintos tamaños de partículas que los componen. Así, es posible diferenciar claramente dos tipos de áridos utilizados en la fabricación del hormigón: áridos finos y gruesos.

De acuerdo con la normativa, el árido fino o arena está compuesto por partículas con un tamaño que no supera los 4,75 mm, mientras que su fracción más fina es retenida en un tamiz de 0,075 mm. La función más específica del agregado fino en la mezcla es la de contribuir con la trabajabilidad, actuando como un lubricante natural que facilita la interacción entre los áridos gruesos y contribuye a una mejor cohesión de la mezcla.

Por otro lado, los áridos gruesos abarcan partículas con tamaños entre 4,75 mm y 75 mm. Aquí se distinguen principalmente gravas y gravillas, siendo principalmente usados para fabricar hormigón dimensiones de entre 10 y 20 mm. Se les atribuye otorgar una base de resistencia mecánica y dar estabilidad al compuesto. Además de la granulometría, su forma también debe ser evaluada: chancada o rodada, y otros factores como el grado de limpieza, ya que pueden generar diferentes desempeños en cuanto a segregación y adherencia con el cemento, lo que podría comprometer la resistencia final del hormigón [17].

Cabe mencionar que, históricamente, la normativa chilena solo ha contemplado el uso de áridos naturales, extraídos normalmente desde ríos o canteras, dejando de lado cualquier otro tipo de árido

no natural. Sin embargo, en 2024, se ha concretado una actualización de la norma NCh163, donde se abre la puerta al aprovechamiento de áridos reciclados o artificiales. Adicionalmente, en el mismo año se promulgó la nueva norma NCh3849, que establece criterios para la clasificación y caracterización de áridos reciclados a partir de residuos de construcción y demolición [18].

2.1.3 Agua

Es el componente que permite la hidratación inicial del cemento, facilitando la fluidez y trabajabilidad de la mezcla. Es usada durante el amasado, pero también en el proceso de curado, donde contribuye a mantener las condiciones de humedad necesarias para el desarrollo adecuado de las propiedades del hormigón. El agua empleada debe estar libre de impurezas que puedan afectar negativamente al hormigón, como sulfatos, cloruros u otras sustancias en suspensión o disueltas que alteren el fraguado o reduzcan la durabilidad del material. La clasificación y los requisitos que debe cumplir el agua para uso en hormigón se especifican en la norma técnica chilena NCh 1498-12 [19].

2.2 Hormigón reforzado con fibras

Un hormigón reforzado con fibras (HRF) es un material compuesto al que se le incorporan fibras aleatoriamente distribuidas en su composición, las cuales actúan como un mecanismo de refuerzo para soportar esfuerzos de tracción y flexión. Esta adición sirve para contrarrestar las deficiencias que sufre el hormigón, que son justamente su baja resistencia a la tracción (unas 10 veces menor a la resistencia a la compresión) y la tendencia al agrietamiento. En comparación con un hormigón convencional, el comportamiento mecánico de un HRF puede ser significativamente diferente y se pueden alcanzar distintos resultados en términos de resistencia o ductilidad del material. Como se verá en las siguientes secciones, son muchos los factores que juegan un papel dominante en la determinación del rendimiento mecánico y físico del hormigón reforzado, lo que incluye entre otros, la cantidad de fibras añadidas y las características de los filamentos.

2.2.1 Fibras de refuerzo

Las fibras se definen como filamentos delgados y alargados fabricados a partir de materiales naturales o manufacturados, que pueden distribuirse en una mezcla de hormigón fresco de manera uniforme. Documentos como ASTM C1116 [20], clasifican estos filamentos según su composición en cuatro tipos: acero, vidrio, fibras sintéticas y fibras naturales.

Pueden estar elaboradas en distintas dimensiones y geometrías. Según su tamaño y función, se dividen en dos grupos principales: microfibras y macrofibras. Las microfibras son fundamentalmente finas

con un diámetro de entre 0,02 y 0,05 mm y longitud máxima de 25 mm, su uso en el hormigón ha sido extendido específicamente para control de agrietamiento por contracción en el hormigón fresco. En cambio, las macrofibras poseen diámetros por sobre 0,05 mm y longitudes superiores a 15 mm, se utilizan tanto para controlar grietas por contracción plástica o térmica, pero también para aportar capacidad de carga posterior al agrietamiento en elementos de hormigón sometidos a flexión y tracción.

Un parámetro empleado usualmente para describir dimensionalmente las fibras es la relación de aspecto, definida como el cociente entre la longitud de la fibra y su diámetro equivalente (L_f/d_f). En el caso de fibras con geometría rectangular, el diámetro equivalente puede obtenerse a partir del área de la sección transversal mediante la expresión (1), donde b es el ancho de la fibra y t es el espesor.

$$d_f = \sqrt{\frac{4bt}{\pi}} \quad (1)$$

2.3 Fundamentos del refuerzo con fibras

El estudio del HRF ha sido abordado por diversos organismos internacionales, entre los cuales se destaca el ACI, en específico a través del Comité 544 [21], del cual han surgido numerosas investigaciones que han profundizado en las propiedades de resistencia, deformación y condiciones de servicio que ofrece un HRF. Se ha determinado que, en su conjunto, el material reforzado actúa de la siguiente manera: por un lado, la matriz de hormigón proporciona la resistencia base a la compresión y la rigidez, distribuyendo los esfuerzos y protegiendo las fibras. Por su parte, las fibras soportan los esfuerzos a tracción, controlando la fisuración y mejorando la capacidad de absorción de energía.

La Figura 2.2 ilustra los mecanismos de acción de las fibras y los modos de falla asociados. En términos teóricos, el refuerzo actúa desde la prevención del agrietamiento retrasando su aparición (5), posteriormente, una vez iniciada la fisuración, las fibras funcionan como un puente que mantiene la cohesión del material cementicio (3). La pérdida de adherencia o el desprendimiento de las fibras respecto a la matriz (4) puede conducir a una falla por extracción (2). Por el contrario, cuando las tensiones superan la resistencia propia de las fibras, se produce una falla por ruptura (1).

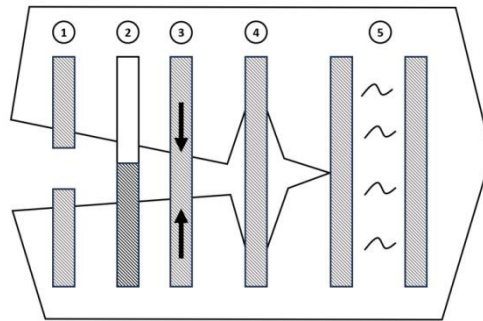


Figura 2.2: Mecanismos de acción y modos de falla asociados en hormigón reforzado con fibras [11].

Todas las formas de acción contribuyen a disipar una cantidad significativa de energía, generando un efecto acumulativo que permite redistribuir los esfuerzos dentro del material y estabiliza la propagación de grietas. Para alcanzar un diseño eficiente, las fibras deben presentar una elevada resistencia a la tracción y un alto módulo de Young [11], sin embargo, es preferible que se produzca primero la falla por tracción de las fibras, antes que su extracción de la matriz. Para maximizar la eficiencia del refuerzo, la fuerza de adherencia debe aproximarse lo más posible a la resistencia a la tracción de las fibras, permitiendo un equilibrio adecuado entre unión y capacidad resistente.

Otra manera de visualizar el aporte de las fibras, es mediante la realización de una prueba de carga de deflexión, como lo ilustra la Figura 2.3. En la curva resultante, se observa que hasta el punto en donde se alcanza la resistencia a tracción de la matriz (momento en el cual se produce la primera fisura), no existe una diferencia significativa en el comportamiento elástico entre un hormigón simple y uno reforzado con fibras. De hecho, la resistencia a la primera fisura de una muestra reforzada no necesariamente será mayor. Sin embargo, pasado este punto, la curva de un hormigón simple cae abruptamente, mientras que la del HRF no falla repentinamente y mantiene la capacidad de soportar carga residual. El área bajo esta parte de la curva representa la capacidad de absorción de energía (tenacidad).

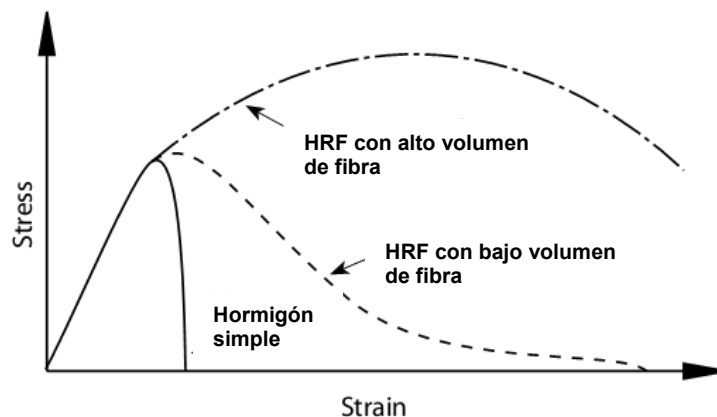


Figura 2.3: Curva esfuerzo - deformación resultante tras prueba de deflexión en HRF [45].

En determinadas condiciones, fibras con un alto desempeño aplicadas en dosis elevadas pueden inducir un fenómeno conocido como ‘endurecimiento por deformación’. Este efecto se caracteriza porque, tras la aparición de la primera fisura, el material no pierde resistencia, sino que es capaz de soportar cargas crecientes, incluso superando la carga aplicada antes de la fisuración, como también se observa en la Figura 2.3.

La cantidad de fibras añadidas se cuantifica habitualmente mediante la dosificación (Dos), que representa la masa de fibras por unidad de volumen de hormigón. Alternativamente, esta dosificación puede expresarse de forma adimensional mediante la fracción volumétrica de fibras V_f , la cual se calcula como el cociente entre la dosificación (Dos) y la densidad del material de la fibra γ_f . El volumen de fibras se expresa comúnmente como un porcentaje respecto al volumen total del hormigón.

2.4 Caracterización del hormigón reforzado con fibras

A continuación, se mencionan las principales propiedades que sirven para caracterizar un HRF en estado fresco y endurecido, junto con los ensayos correspondientes empleados para su evaluación.

2.4.1 Docilidad

Las propiedades del estado fresco son determinantes, pues definen en gran medida las prestaciones finales que ofrecerá el hormigón en su estado final. En ese sentido, la docilidad es una medida de la consistencia de una mezcla de hormigón que determina el nivel de trabajabilidad en estado fresco. Una trabajabilidad adecuada evita obtener mezclas excesivamente secas o fluidas y permite encontrar la consistencia óptima del material para poder ser manejado, colado o compactado en moldes, minimizando la segregación y asegurando un relleno uniforme de volúmenes sin generar huecos ni porosidades.

La forma más común de determinar esta característica es a través del ensayo de cono de Abrams, un procedimiento ampliamente extendido, que se encuentra estipulado en la norma chilena NCh1019 [22]. Se realiza utilizando un molde de forma troncocónica, abierto en ambos extremos, el cual es relleno con la mezcla y compactado. Una vez completado el llenado, se retira el molde dejando que la mezcla se asiente, procediéndose a medir y registrar el asentamiento como la diferencia entre la altura original del cono y la posición final de la superficie superior del hormigón, como se ilustra en la Figura 2.4. La magnitud del asentamiento indica el tipo de consistencia y, por ende, el nivel de docilidad, buscándose idealmente una consistencia de tipo plástica. La Tabla 2.1 presenta la relación entre los valores obtenidos en el ensayo y el nivel de docilidad de la mezcla.

Tabla 2.1: Relación entre medida de asentamiento en cono de Abrams y tipo de consistencia del hormigón.

Asentamiento en [mm]	Tipo de consistencia
0 a 20	Seca
20 a 60	Plástica
50 a 80	Blanda
80 a 140	Fluida
> 140	Líquida

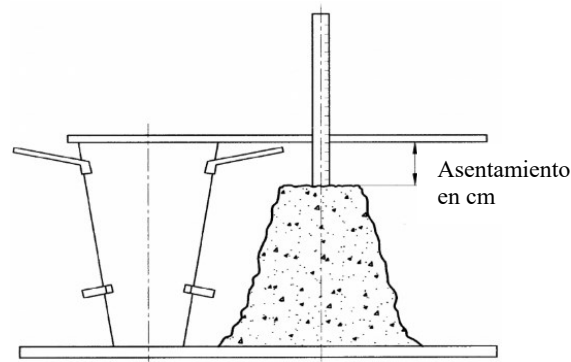


Figura 2.4: Determinación del asentamiento del hormigón mediante ensayo de cono de Abrams [22].

2.4.2 Resistencia a la compresión

El principal parámetro para satisfacer condiciones de resistencia mecánica en el hormigón es la resistencia a la compresión, que es su capacidad para resistir esfuerzos axiales de compresión sin fallar. Para evaluar esta condición, probetas de hormigón son sometidas a la aplicación de fuerzas graduales hasta el punto en que se produzca la franca rotura del material; esto es cuando el indicador de carga retrocede hasta el 90% de la carga máxima y hay claras manifestaciones de agrietamiento en la muestra. Usualmente se usan velocidades de aplicación de carga de 0,25 Mpa/s. Las probetas ensayadas pueden ser cúbicas o cilíndricas y deben pasar por un proceso de curado de 28 días en condiciones específicas de laboratorio en cuanto a humedad relativa ($\geq 90\%$) y temperatura (20 ± 3 °C). Más detalles acerca de este procedimiento se establecen en la NCh 1037 [23].

Conocida la sección de la probeta S y determinada la fuerza P a la que se produce la falla, entonces se determina el esfuerzo de resistencia en compresión de acuerdo a la ecuación (2).

$$f_c = \frac{P}{S} \quad (2)$$

2.4.3 Resistencia a la tracción

Debido a la muy baja resistencia a la tracción que posee el hormigón, esta propiedad no se tiene en cuenta para efectos de diseño. Sin embargo, cobra importancia siendo una limitante en el agrietamiento del concreto. Se puede evaluar de forma indirecta por medio de ensayo de tracción por hendimiento, usualmente mediante probeta cilíndrica y aplicando una carga de compresión en toda la longitud de su diámetro; de esta manera se induce la falla por tracción del elemento ya que se produce una distribución uniforme de tracciones transversales a lo largo del eje de carga. Es un procedimiento ampliamente utilizado y su metodología está especificada en la norma NCh 1170:2012 [24].

2.4.4 Resistencia a la flexión

El ensayo de flexotracción es otro método indirecto de probar la resistencia a la tracción mediante la aplicación cargas de flexión. Según la norma NCh 1037 [25], este ensayo se realiza cargando una viga prismática simplemente apoyada, utilizando una configuración de carga central o con dos puntos de carga ubicados en los tercios centrales de la probeta. La carga proporcionada por la prensa de ensayo se incrementa uniformemente hasta alcanzar la rotura de la pieza, con velocidades de aplicación continua que varían entre 0,86 y 1,21 MPa/min.

Para una muestra ensayada bajo carga en el medio de su luz, como en la Figura 2.5, la resistencia a la flexión o tensión de rotura f_r estará dada por la ecuación (3), donde b es la longitud de la sección cuadrada del prisma, P es la carga aplicada en la mitad de la viga en la rotura y L es la distancia entre los rodillos de soporte.

$$f_r = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3)$$

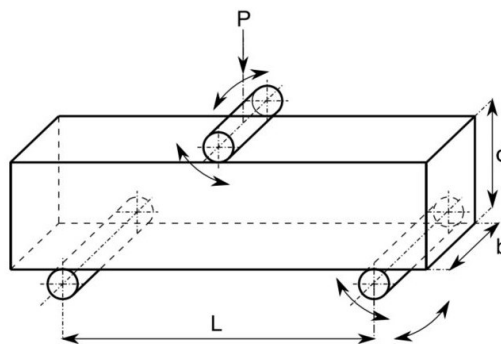


Figura 2.5: Probeta de hormigón en dispositivo de carga de flexión.

2.5 Fenómeno de agrietamiento en el hormigón

Las fisuras y grietas se definen como discontinuidades en el material que, dependiendo de sus dimensiones, pueden afectar la servicialidad y durabilidad de estructuras completas de hormigón. Es un fenómeno inevitable y la relativa facilidad con la que se presenta es consecuencia de la baja resistencia a la tracción del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, y de su limitada tenacidad. Se puede distinguir entre fisuras y grietas: siendo las fisuras discontinuidades con aberturas de hasta 1 milímetro de ancho que se presentan de manera superficial, mientras que las grietas presentan aberturas mayores y pueden extenderse a lo largo de todo el espesor de una estructura de hormigón.

Existen correlaciones entre el ancho de una fisura y el nivel de riesgo que representa para una estructura. En aplicaciones como pisos, por ejemplo, fisuras superiores a 0,8 mm se consideran severas, y mayores a 1,5 mm toman el carácter de inaceptables, requiriendo eventualmente algún tipo de reparación, ya que este grado de agrietamiento no permite una adecuada transferencia de carga y, en el caso de hormigones armados, representa un riesgo latente de corrosión en las armaduras [26].

Si bien la aparición de grietas puede resultar como consecuencia de varios motivos estructurales: del reparto defectuoso de cargas, sobrecargas, movimiento del suelo, entre otros. A continuación, son descritas las formas más usuales de agrietamiento por contracción y que son de principal interés para este trabajo.

2.5.1 Contracción plástica

Este tipo de agrietamiento se produce inmediatamente después del vaciado del hormigón fresco y es consecuencia de una alta tasa de evaporación superficial de humedad (mayor a 0,5 kg/m²/h), que no alcanza a ser compensada por el agua de exudación interna. Como resultado, la superficie del hormigón se contrae en mayor medida que en el interior, desarrollando tensiones que exceden la resistencia de tracción dando lugar a la aparición de grietas [27]. Otros factores, como el viento al acelerar el secado superficial, intensifican este fenómeno.

Es común en estructuras horizontales, como las losas, y suele aparecer en la superficie con un patrón de grietas paralelas, separadas entre sí a distancias que oscilan entre 0,3 y 0,9 metros sin interceptar generalmente el perímetro de la losa.

2.5.2 Contracción por secado

La contracción por secado ocurre cuando el hormigón, ya endurecido, pierde por evaporación gradualmente el agua contenida en sus poros capilares debido a la exposición al ambiente. Esto genera una reducción de volumen en el material, lo que da lugar a deformaciones que, si están restringidas por elementos estructurales o condiciones de apoyo, pueden provocar tensiones internas de tracción [28]. Tal como en el caso anterior, si estas tensiones superan la resistencia del hormigón, se producen fisuras, pero generalmente distribuidas de forma aleatoria y de mayor profundidad que las asociadas a la contracción plástica. La magnitud de este tipo de contracción depende de diversos factores, como la relación agua/cemento, el contenido de finos, las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa, viento), y el grado de restricción al movimiento libre del hormigón. En aplicaciones como losas, se provoca por la restricción que ofrece principalmente la fricción sobre la base donde se encuentra apoyada (véase la Figura 2.6) u otro elemento estructural.

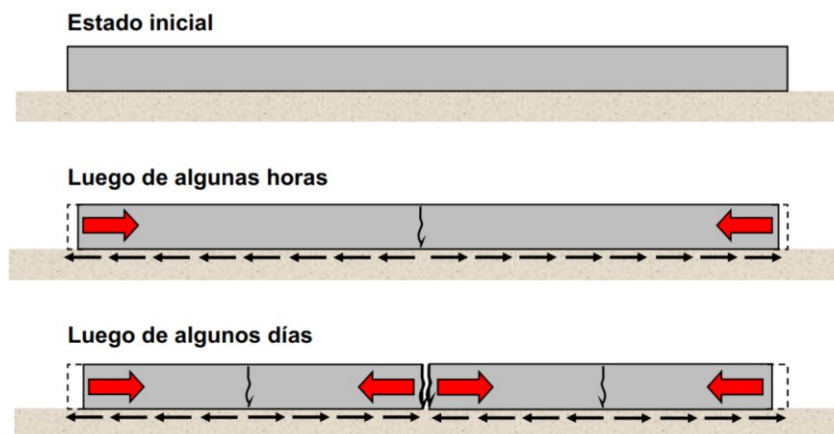


Figura 2.6: Contracción por secado en losas y formación de fisuras por restricción de la superficie.

Además de la contracción plástica y por secado, también pueden presentarse contracciones que ocurren como resultado de cambios de temperatura en el entorno o dentro de la propia masa de hormigón. Estos cambios generan variaciones volumétricas que pueden ocurrir en estado fresco o endurecido, y si existen restricciones, pueden provocar agrietamientos. Aunque su origen es distinto al de los mecanismos previamente descritos, sus efectos pueden superponerse, especialmente en estructuras expuestas a ciclos térmicos intensos, por lo que también constituye un factor relevante a considerar en el control del agrietamiento.

CAPÍTULO 3

Estado del arte: Fibras de R-PET en el hormigón

3.1 Fibras de PET recicladas en mezclas de hormigón

Hoy en día existe una acumulación de estudios acerca de la incorporación de fibras de PET recicladas (R-PET) en la fabricación de hormigones y morteros. Estos estudios han sido diversos en cuanto a la dirección que han tomado, apuntando algunos al reemplazo parcial de áridos finos, mientras que otros se han decantado por la adición en forma de fibras como refuerzo. A continuación, se presenta una revisión del estado del arte enfocada en la incorporación de fibras de PET como refuerzo, abarcando una amplia gama de resultados relacionados con su forma, tamaño, rugosidad superficial y su influencia en el desempeño mecánico y físico del hormigón.

Técnicamente, el uso del PET como fibra de refuerzo en el concreto es viable, ya que, para comenzar este polímero presenta una resistencia a la tracción superior a la del hormigón. Así lo muestran algunos tests en donde se caracterizan fibras rectas de R-PET, las cuales pueden alcanzar valores medios de resistencia a la tracción superiores a 150 Mpa [29]. Además, al igual que otros plásticos, el PET presenta una capacidad de elongación superior al 50%, lo que favorece su comportamiento dúctil. La Tabla 3.1 resume algunas de sus principales propiedades físicas y mecánicas.

Tabla 3.1: Propiedades físicas y mecánicas típicas de las fibras recicladas de PET.

Propiedad	Valor típico
Densidad [g/cm ³]	1,37 - 1,41
Resistencia a la tracción [Mpa]	85 - 200
Módulo de elasticidad (tracción) [Mpa]	2500 - 3100
Elongación hasta el fallo [%]	50 - 80
Temperatura de fusión [°C]	252,8
Absorción de agua [%]	3,3

3.2 Efecto de las fibras R-PET en la resistencia mecánica del hormigón

Para tener un buen entendimiento del comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras recicladas, dos aspectos fundamentales han sido profundizados por los investigadores: el impacto del volumen de fibra añadida y la influencia de su longitud.

Deteniéndose con lo que sucede específicamente en la resistencia a la compresión, los resultados son variados. Por un lado, se han informado mejoras, como la observada por Fraternali *et al.* [30], quienes indicaron que esta propiedad aumentó en un 22% en comparación con un hormigón simple, al añadir volúmenes de fibras del 1% en probetas cúbicas. Sin embargo, también se han registrado disminuciones, como en el estudio de Borg *et al.* [31], quienes probaron añadiendo filamentos de 30 y 50 mm en volúmenes desde 0,5% hasta 1,5%. encontrando reducciones de entre 0,5% y 8,5% en comparación a muestras de control, siendo el escenario más desfavorable aquellas muestras que incluían la máxima dosificación de fibras. Otras investigaciones reportaron variaciones moderadas, sin desviaciones significativas respecto del hormigón simple, en distintas configuraciones de dosificación y fibras [10] [12] [32].

Para ejemplificar una de las tendencias reportadas, en la Figura 3.1 se pueden visualizar los resultados de ensayos de compresión llevados a cabo con probetas cúbicas tras 7, 14 y 28 días de curado, utilizando fibras PET de 15 mm de longitud [33]. Los resultados evidencian una reducción en los esfuerzos máximos de compresión, y a los 28 días se aprecian disminuciones porcentuales de 8,1%, 10,5%, 26,1% y 26,15% para los hormigones con 0,5%, 1,0%, 1,5% y 2,0% de fibra R-PET, respectivamente.

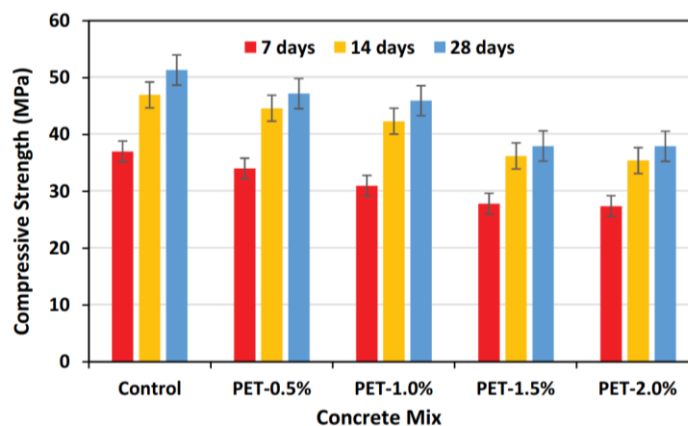


Figura 3.1: Evolución de la resistencia a compresión del hormigón con diferentes contenidos de fibras PET recicladas a los 7, 14 y 28 días [33].

La reducción en la resistencia a la compresión se ha atribuido a varios factores. Entre los más relevantes se encuentra la formación de aire encapsulado y porosidad dentro de la matriz del hormigón, inducida por la presencia de las fibras. Además, la adherencia entre las fibras y la pasta de cemento no siempre es óptima, lo que puede generar puntos débiles que favorecen la aparición de microfisuras tempranas durante los ensayos de resistencia. También se ha observado que el agrupamiento de fibras durante las etapas de mezclado y vertido puede afectar negativamente la estructura y homogeneidad del hormigón en estado endurecido.

Por otro lado, en configuraciones bien diseñadas y con una adecuada dispersión, las fibras pueden mejorar la resistencia al limitar la propagación de microgrietas y favorecer una distribución más uniforme de tensiones. Esta interacción puede generar un efecto de confinamiento local que incremente la capacidad del hormigón frente a compresión axial.

Asimismo, la relación de aspecto de las fibras juega un papel relevante. Se ha mostrado que fibras PET demasiado largas tienden a generar una mayor reducción en la resistencia a la compresión en comparación con aquellas de menor longitud [34], lo que sugiere que el tamaño y forma de las fibras deben ser cuidadosamente considerados para logran un buen rendimiento del material.

Viendo ahora lo que sucede con la resistencia a la tracción, la Figura 3.2 presenta los resultados obtenidos mediante ensayos de tracción por hendidura. Se observan aumentos en esta propiedad para fracciones de volumen de fibra entre 0,5 % y 1,5 %, sin embargo, al superar ese rango, la resistencia se desploma de forma notable [35]. En este caso se utilizaron fibras de 25 mm de longitud, con dos relaciones de aspecto (35 y 50), siendo las más esbeltas las que ofrecieron el mejor desempeño, alcanzando un incremento del 19% respecto al hormigón de referencia. Cabe mencionar, no obstante, que en otros estudios se han reportado también resultados con mejoras nulas o incluso reducciones en esta propiedad, del orden de entre un 9 % y un 16 % [34].

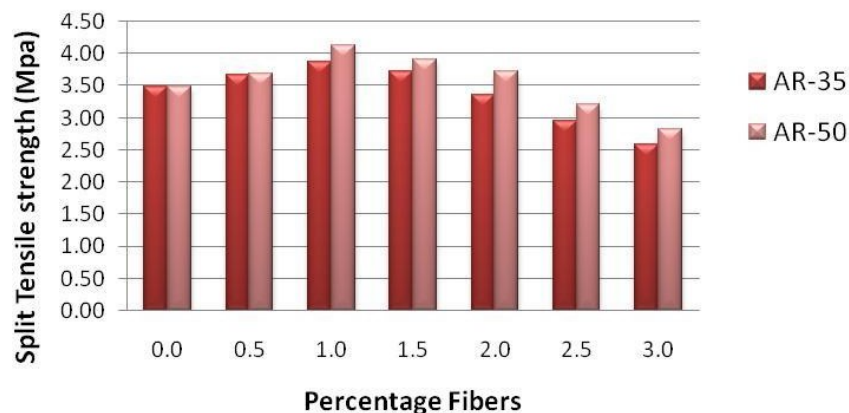


Figura 3.2: Esfuerzo de tracción por hendidura de HRF vs volumen de fibras en dos configuraciones de relaciones de aspecto en fibra PET de 25 mm [35].

Al revisar resultados de pruebas de flexotracción de elementos reforzados, se ha encontrado que las fibras de R-PET son capaces de aumentar la resistencia última a flexión. Por ejemplo, Pelisser *et al.* [36] ensayaron muestras prismáticas con fibras rectas de 20 mm, obteniendo el mejor rendimiento con un contenido de 0,30 % en volumen, que logró un incremento del 19,2 % en la resistencia a los 28 días respecto al hormigón de referencia. Estos resultados son consistentes con otras investigaciones que reportan incrementos cercanos al 18 % en esta propiedad, aunque obtenidos con fibras de mayor longitud (50 mm) y evaluados mediante ensayos con viga entallada [31], aquí también se indicó que

solo las muestras que contenían hasta un 1 % en volumen de fibras alcanzaron mejoras en la resistencia a la flexión, mientras que con dosificaciones superiores el rendimiento decayó, posiblemente debido a efectos de dispersión.

Sin embargo, al analizar el comportamiento post-fisuración, se observan tendencias un tanto distintas. En el último estudio citado, Borg *et al.* [31] reportaron que la resistencia residual en flexión continuó mejorando con el aumento del contenido de fibras, alcanzando sus mejores valores con una dosificación del 1,5 %. Este resultado se evidenció en las cargas soportadas por las vigas durante el ensayo, correspondientes a distintas aperturas controladas de fisura.

Además del enfoque estructural basado en resistencia residual ante distintas aperturas de fisura, como el utilizado por Borg [31], otros estudios han abordado el comportamiento post-fisura desde perspectivas complementarias, centradas en la energía disipada o la capacidad de deformación.

En este sentido, se ha reportado un incremento de hasta 7,8 veces en la energía absorbida respecto del hormigón simple al incorporar un 1 % de fibras R-PET con una longitud de 25 mm —correspondiente a la menor longitud de fibra evaluada— [32], evidenciando así una mejora sustancial en la tenacidad post fisura del material, como se observa en la Figura 3.3. El resultado óptimo se atribuye, según los autores, a que al usar fibras más cortas con la misma fracción volumétrica, se introduce un mayor número de filamentos en la mezcla, lo que mejora la resistencia del hormigón a microfisuras, permite una distribución más eficiente en la matriz y disminuye la porosidad.

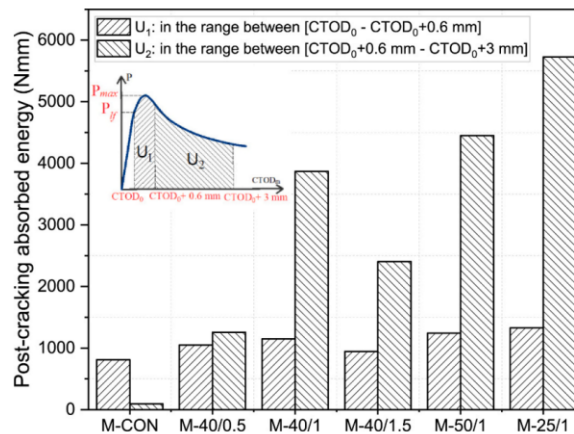


Figura 3.3: Energía absorbida post-fisura en HRF con diferentes longitudes y dosificaciones de fibras R-PET [32].

Una tendencia similar fue observada por Fraternali *et al.* [30], al analizar el comportamiento del hormigón en términos de deformación en régimen post-falla. Con una dosificación del 1 % de fibras R-PET de 52 mm, reportaron incrementos modestos en la resistencia a la flexión (hasta un 7,7 %), pero acompañados de un aumento sustancial en los índices de ductilidad —definidos como la relación entre la deformación máxima y la correspondiente al límite elástico—, alcanzando hasta un 544 %.

Estos resultados confirman que, incluso con mejoras modestas en la resistencia inicial, las fibras R-PET permiten una respuesta post-fisura significativamente más dúctil, especialmente en condiciones de daño avanzado, donde el hormigón convencional muestra un comportamiento frágil.

Se destaca, además, el efecto de costura generado por las fibras, lo que impidió la separación completa de las muestras incluso ante grietas de gran tamaño, como se observa en la Figura 3.4. Esta acción permitió mantener la cohesión de la matriz cementicia, facilitando una redistribución gradual de la carga durante el proceso de agrietamiento.

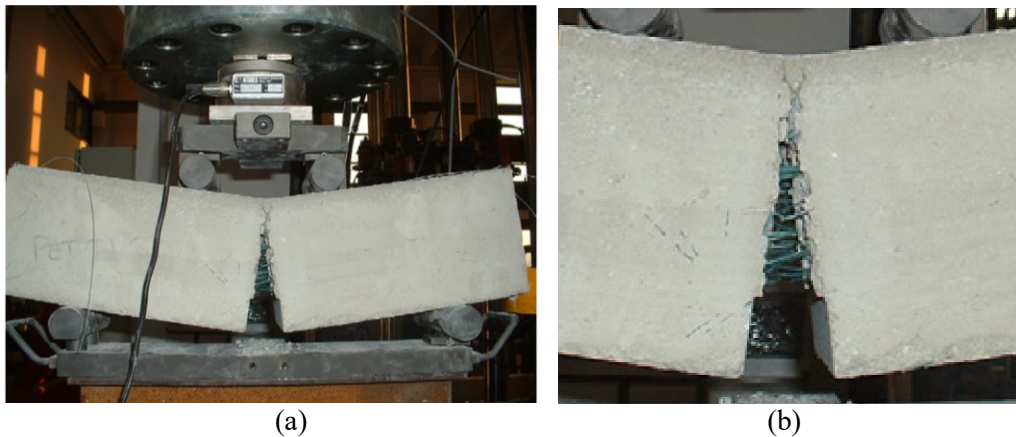


Figura 3.4: (a) Configuración de colapso de una viga con fibras PET en ensayo de flexión. (b) Detalle del efecto de puente de las fibras sobre la grieta [30].

Algunos estudios recientes han abordado la búsqueda de configuraciones óptimas para las fibras de PET reciclado, considerando tanto su dosificación como sus dimensiones geométricas, para maximizar su efecto en el comportamiento mecánico del hormigón. En este sentido, Meza *et al.* [34] realizaron un análisis estadístico-experimental basado en un diseño factorial completo, evaluando el efecto combinado de la dosificación de fibras (entre 2 y 10 kg/m³) y su relación de aspecto (entre 50 y 110) sobre propiedades como el módulo de elasticidad, la tenacidad y las resistencias a compresión, tracción y flexión. El estudio, sustentado en los resultados de 120 muestras, concluyó que la dosificación tiene una influencia más significativa que la relación de aspecto, sobre el rendimiento global del hormigón. La combinación de mayor dosificación y mayor relación de aspecto ofreció las mejores prestaciones mecánicas.

Complementariamente, Mouna *et al.* [32] realizaron un análisis estadístico de datos experimentales, considerando tres fracciones de volumen (0,5 %, 1,0 % y 1,5 %) y evaluando el efecto de la longitud de la fibra sobre propiedades como la resistencia a compresión y tracción, módulo elástico, disipación de energía y contracción plástica. Los resultados indicaron que una fibra de 25 mm de longitud y 1 % en volumen proporciona el mejor desempeño global, especialmente en términos de ductilidad. Sin

embargo, también se observó que contenidos superiores al 1 % tienden a reducir la resistencia a compresión y tracción. Ambos estudios coinciden en que existe un punto óptimo en la dosificación de fibras PET recicladas, donde se maximizan las propiedades post-fisuración sin comprometer significativamente la resistencia inicial del material.

La incorporación de fibras R-PET también ha sido estudiada en mezclas de hormigón de alta resistencia, caracterizadas por llevar una baja relación agua/cemento y de especial interés para ciertas aplicaciones. Mohammed *et al.* [37] analizaron muestras reforzadas con diferentes fracciones y relaciones de aspecto de fibras, y encontraron que, al añadir fibras de 40 mm de longitud en una proporción del 1,5% en volumen, se lograron mejoras del 63,3% en la resistencia a la tracción y del 24,7% en la resistencia a la flexión. No obstante, también se observó una disminución en la resistencia a la compresión en todos los casos evaluados, con una pérdida máxima del 15,7% al emplear la fibra más corta, de 10 mm. Asimismo, se evaluó la resistencia al impacto en muestras cilíndricas, obteniéndose sorprendentes incrementos de hasta un 300% en la energía absorbida hasta la aparición de la primera grieta, y de un 833% hasta la falla total del elemento.

3.2.1 Efecto de la geometría de las fibras de R-PET en el hormigón

Debido a que el desprendimiento y el deslizamiento de las fibras en la interfaz de cemento tienen un impacto sustancial en la capacidad de absorción total de energía durante la propagación y estabilización de las grietas, es que algunos investigadores se han enfocado en explorar alternativas que permitan mejorar la adherencia que ofrece la superficie de las fibras PET. Estas fibras, debido a su superficie lisa, presentan enlaces débiles con poca fricción mecánica en la zona de contacto dentro del hormigón. Ante esta limitación, se han propuesto estrategias como la modificación de la rugosidad superficial o el rediseño de la geometría de las fibras, soluciones que han dado buenos resultados en fibras de otros polímeros como el polipropileno virgen [38]. A partir de este enfoque, se han aplicado principios similares al diseño de fibras de PET reciclado, con resultados igualmente prometedores.

La capacidad de anclaje de las fibras R-PET en la matriz de cemento ha sido probada mediante pruebas de extracción (pullout test). Kim *et al.* [27] estudiaron tres tipos de geometrías: fibras rectas, onduladas y con relieve (Figura 3.5), todas con una longitud de 50 mm y un ancho de 1 mm. Según los resultados presentados en la Figura 3.6(b), se encontró que la fibra con relieve ofrece la mayor resistencia de unión mecánica, alcanzando 5 MPa; esto se debe a que su superficie texturizada genera mayor fricción y anclaje mecánico con la matriz cementicia. Le sigue la fibra ondulada, con una resistencia de 3,9 MPa, mientras que la fibra recta registró el valor más bajo, con solo 1,7 MPa.

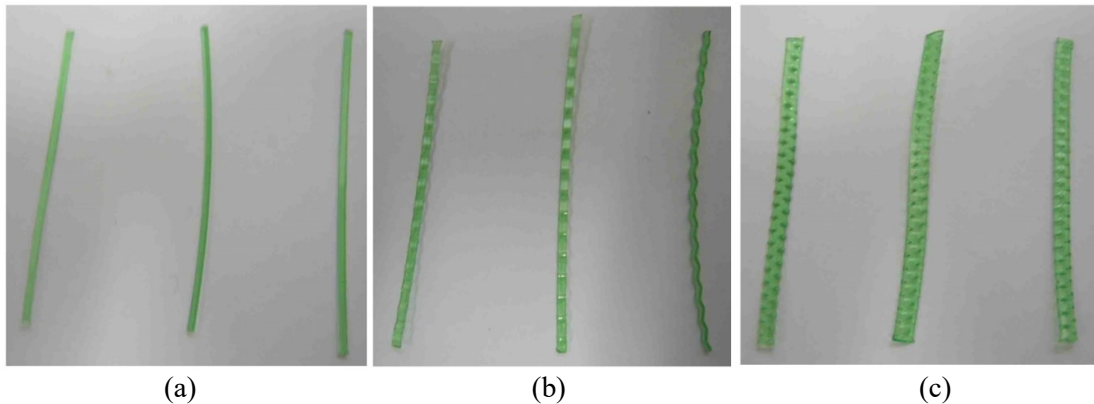


Figura 3.5: Tres configuraciones geométricas de fibras de PET. (a) Rectas; (b) Onduladas; (c) Con relieve [27].

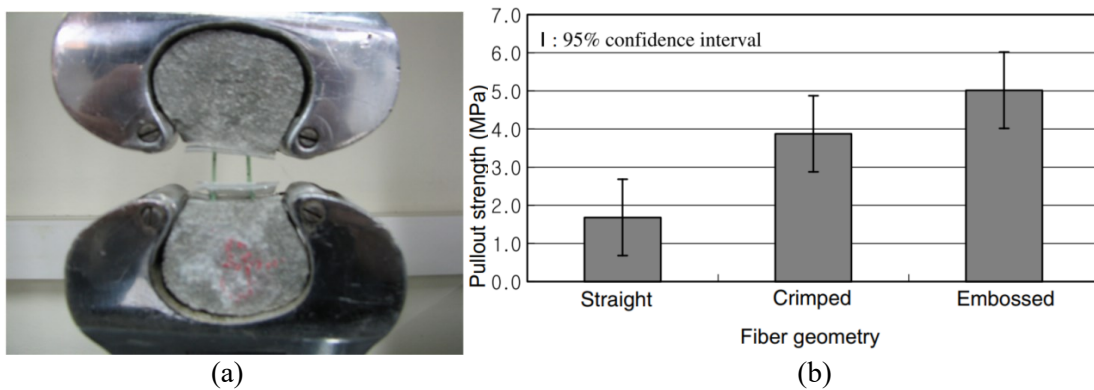


Figura 3.6: (a) Ensayo de extracción (pullout test) de fibras PET. (b) Resistencia de unión mecánica para los tres tipos de fibras PET ensayadas [27].

Los resultados antes mencionados han sido respaldados por el estudio de Borg *et al.* [31], quienes en su caso probaron fibras rectas y deformadas, añadiendo tres surcos en su estructura. Las fibras deformadas demostraron un mejor anclaje en la matriz cementicia, ya que, a diferencia de las rectas, no fueron extraídas por deslizamiento, sino que fallaron por fluencia, lo cual indica una adherencia superior. Esta diferencia de comportamiento confirma que la geometría de la fibra influye directamente en la eficacia del anclaje mecánico, y, por tanto, en la capacidad del material para resistir el agrietamiento en etapas tempranas.

Además, si bien ambas configuraciones redujeron la resistencia a compresión respecto al hormigón de control, las fibras deformadas provocaron una disminución menos acentuada. En términos de comportamiento a flexión, se determinó que la longitud de la fibra tuvo mayor efecto que su forma, aunque las fibras deformadas proporcionaron una capacidad residual entre un 10 % y un 20 % superior a la de las fibras rectas.

En una línea similar, Marthong y Sarma [39] llevaron a cabo una investigación experimental para evaluar el efecto de cuatro geometrías distintas de fibras PET sobre las propiedades mecánicas del hormigón. Las configuraciones se pueden visualizar en la Figura 3.7 y los especímenes reforzados con cada geometría se pueden definir como: con fibras rectas (SP2), con fibras de extremos aplanados (SP3), con fibras hoja de sierra (SP4) y con fibras con extremos curvos (SP5). Manteniendo una dosificación constante de 0,5% en volumen, los resultados mostraron que el hormigón reforzado mejora significativamente la resistencia a compresión, tracción y flexión del hormigón, con variaciones según la geometría utilizada. La configuración SP4 presentó el desempeño más favorable, alcanzando incrementos del 24% en resistencia a compresión y del 34% en flexión, en comparación con el hormigón reforzado con fibras rectas. Las curvas de comportamiento en flexión, mostradas en la Figura 3.8, revelan un mejor rendimiento en los especímenes SP3, SP4 y SP5 en términos de carga última y capacidad de disipación de energía, frente a los especímenes SP1 (sin fibras) y SP2.

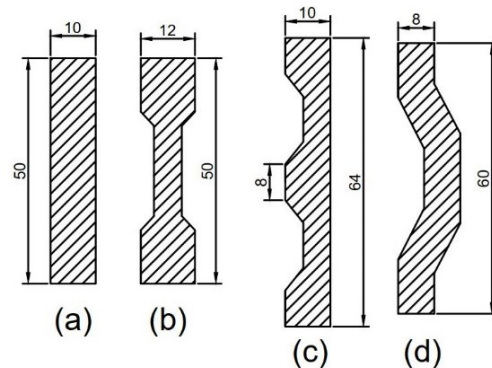


Figura 3.7: Geometrías de fibras R-PET ensayadas: a) Recta, b) Extremos aplanados, c) Hoja de sierra, d) Extremos rizados (dimensiones en mm) [39].

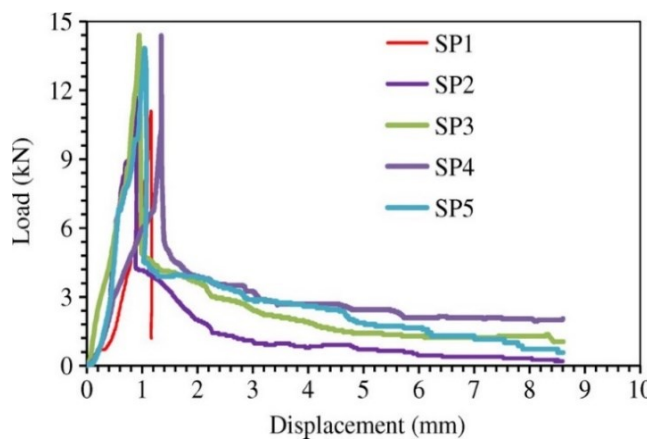


Figura 3.8: Curvas carga–desplazamiento ensayo de flexión para especímenes con fibras PET mostradas en Figura 3.7 [39].

Interesantes pruebas experimentalmente se han llevado a cabo para evaluar el comportamiento de fibras en forma circulares en forma de ‘O’, como las mostradas en la Figura 3.9(a). Revathi *et al.* [40] incorporaron este tipo de fibras en una mezcla de hormigón, utilizando cortes de botellas recicladas con dimensiones aproximadas de 80 mm de diámetro y 5 mm de ancho. Tras realizarse pruebas de resistencia en compresión y flexión e inspeccionar el material, se encontró que las fibras lograron crear una fuerte unión dentro del material, formando pequeñas masas compactas de concreto, las cuales se originan en los puntos de dispersión de las fibras. Este efecto es visible en la Figura 3.9(b), donde los componentes de la mezcla quedan encapsulados dentro del perímetro de la fibra. En el círculo amarillo se aprecia cómo una fibra retiene simultáneamente dos masas de concreto, una de las cuales tendía a desprenderse. Finalmente, la Figura 3.9(c) ilustra cómo, incluso después de aplicar cargas superiores al límite de ruptura del material, las fibras continúan manteniendo la cohesión interna, lo que demuestra su alta capacidad de anclaje y adherencia dentro del compuesto.

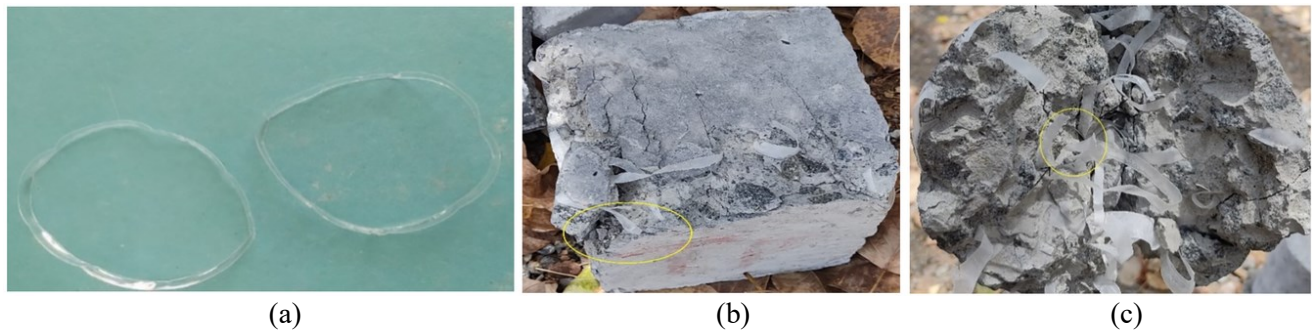


Figura 3.9: (a) Geometría de la fibra PET en forma de “O”. (b) Ruptura localizada en esquina de espécimen cúbico, mostrando retención parcial del hormigón por la fibra. (c) Anclaje interno de fibras en zona de tracción durante ensayo cilíndrico, con evidencia de buena adherencia [40].

Se determinó que la dosificación óptima de fibras PET en forma de “O” corresponde a un 0.3 % en peso respecto al contenido de cemento. Superar este porcentaje podría generar efectos contraproducentes, ya que una mayor cantidad de fibras tiende a segmentar la mezcla en porciones más pequeñas, afectando negativamente la cohesión y adherencia interna. Luego de 28 días de curado, las probetas reforzadas con dicha dosificación presentaron mejoras del 12 % en resistencia a la compresión, 25,6 % en la resistencia a tracción indirecta, y hasta un 99 % en la resistencia a flexión, en comparación con la mezcla de referencia sin fibras.

Foti [29] también utilizó fibras circulares, en este caso, las fibras se incorporaron al hormigón en proporciones de hasta 1 % en peso respecto al total del hormigón. Pruebas de flexión revelaron que estas fibras ofrecieron un notable efecto de “costura” en la fase post-fisuración, contribuyendo significativamente a mejorar la ductilidad. Los resultados mostraron que, a mayores porcentajes de fibra (1%), el concreto exhibía una recuperación más efectiva de carga posterior al agrietamiento, con una caída de carga del 35 % respecto al máximo alcanzado, en comparación con el 70 % observado

en mezclas con solo 0.5 % de fibra. Este comportamiento puede observarse en la Figura 3.10, donde se representan las curvas carga-deformación para los distintos porcentajes de fibras PET circulares.

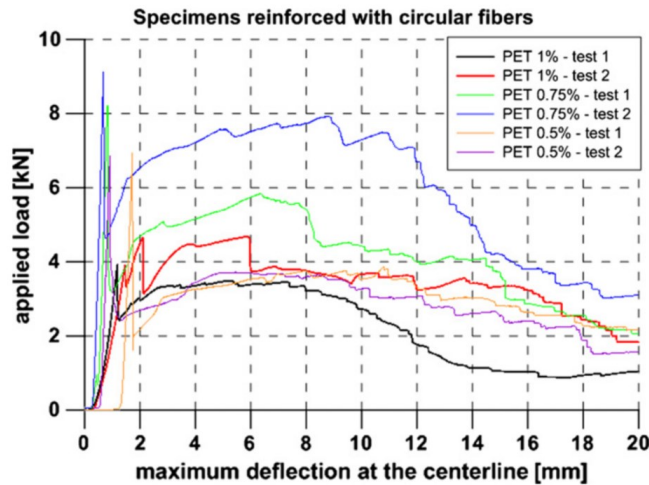


Figura 3.10: Curvas carga-deformación de hormigones con incorporación de fibras PET circulares en proporciones de 0,5 %, 0,75 % y 1 % en peso [29].

3.3 Efecto sobre la docilidad de la mezcla

La incorporación de fibras de R-PET en el hormigón tiende a reducir su trabajabilidad en estado fresco, ya que, como puede ser intuitivo, la mayor fricción generada por la presencia de fibras incrementa la interacción entre los componentes; esto, sumado a la capacidad que tienen las fibras de envolverse con la pasta de cemento, crea una barrera que obstaculiza el desplazamiento normal de la mezcla, haciéndola más difícil de manejar. Se ha detectado también que parte del agua disponible en la mezcla puede ser retenida por la superficie seca de las fibras, reduciendo la fluidez global del compuesto.

El efecto adverso sobre la docilidad se acentúa a medida que aumenta el volumen de fibras incorporadas. No obstante, el hormigón fresco sigue siendo manejable y relativamente fluido mientras el contenido de fibras no supere aproximadamente el 1,5%, siendo posible todavía aún su compactación sin necesidad de aplicar vibraciones excesivas [36].

Asimismo, tanto la longitud como la relación de aspecto de las fibras pueden influir en la trabajabilidad. Fibras más largas tienden a dificultar la dispersión homogénea dentro de la mezcla y a acentuar la pérdida de docilidad del compuesto fresco. En particular, Mouna *et al.* [32] reportaron que una mezcla con fibras de 25 mm de longitud y una fracción volumétrica de 1% presentó un asentamiento un 10% menor respecto a la mezcla de control. En contraste, el uso de fibras de 40 mm con una dosificación de 1,5% produjo una disminución del 40%, evidenciando que la longitud, si bien tiene un efecto secundario, puede agravar la pérdida de trabajabilidad cuando se combina con altos

volúmenes de refuerzo. Por otro lado, algunos estudios han demostrado que la geometría específica de las fibras puede tener un efecto marginal [40].

En la Figura 3.11 se muestran los resultados obtenidos por Meza *et al.* [34], quienes evaluaron el efecto sobre la docilidad del hormigón utilizando el ensayo de cono invertido de revenimiento (ASTM C995), un método mejor adaptado para mezclas reforzadas con fibras. Se consideraron distintas combinaciones de dosificación (2, 6 y 10 kg/m³) y relaciones de aspecto (50, 80 y 110). La muestra de control, sin fibras, alcanzó un asentamiento promedio de 472 mm, aproximadamente un 22% superior al promedio de las mezclas reforzadas. Se puede apreciar, sin embargo, que en su experimentación no se observaron diferencias significativas entre las distintas configuraciones: la diferencia máxima entre mezclas con fibras fue de apenas un 7,6. Curiosamente, las mezclas con mayor dosificación (10 kg/m³ o ~0,73% en volumen) fueron las que menos redujeron la docilidad, caso contrario al común denominador presentado por otros estudios.

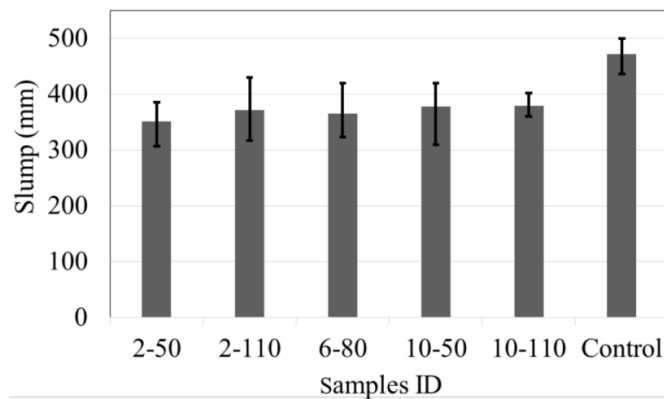


Figura 3.11: Medidas de asentamiento de mezclas de hormigón reforzadas con fibras R-PET en diferentes dosificaciones y relaciones de aspecto [34].

Cuando la incorporación de fibras genera una reducción considerable en la trabajabilidad, una manera de contrarrestar este efecto adverso sería aumentar el contenido de agua en la mezcla; sin embargo, esto iría en detrimento de la resistencia mecánica del hormigón al elevar la relación agua/cemento. Por ello, una alternativa más adecuada consiste en la adición de plastificantes o reductores de agua, que permiten mejorar la trabajabilidad sin comprometer las propiedades estructurales del compuesto [21].

3.4 Efecto en la contracción plástica y por secado

Si bien la inclusión de las fibras PET en el hormigón no afecta la tasa de pérdida de humedad durante las primeras horas de colado —la cual suele oscilar entre 0,5 y 1 kg/m²/h—, se ha encontrado que volúmenes de fibras por sobre el 0,5% son suficientes para generar fuerzas de unión internas en el material durante las primeras 6 o 7 horas críticas, impidiendo y retrasando la propagación de micro y macro grietas [31]. Las fibras mostradas previamente en la Figura 3.5 también fueron probadas en ensayo de Kraai, una metodología estándar utilizada para evaluar el agrietamiento superficial por contracción plástica en hormigones o morteros mediante losas delgadas. Kim *et al.* encontraron que después de 24 horas de exposición a condiciones específicas de temperatura (28 ± 2 °C) humedad relativa ($40 \pm 3\%$) y velocidad del viento (6 m/s), las mezclas sin fibras o con baja dosificación presentaron una fisuración considerable. La Figura 3.12 muestra la reducción del área agrietada en función del volumen de fibras incorporadas, en comparación con una muestra de control. Se puede apreciar una reducción progresiva del área agrietada a medida que se incrementa el volumen de fibras. A bajas dosificaciones (0.25%), la fibra con relieve muestra un mejor efecto sobre la reducción de grietas, logrando una reducción del 84% del área agrietada. Sin embargo, con porcentajes mayores de fibra ($\geq 0,5\%$), el efecto de control de grietas tiende a estabilizarse, y las diferencias entre las distintas geometrías de fibra se vuelven mínimas, lo que sugieren la existencia de una dosificación óptima a partir de la cual el incremento en la cantidad de fibras ofrece beneficios marginales en términos de control del agrietamiento por contracción plástica.

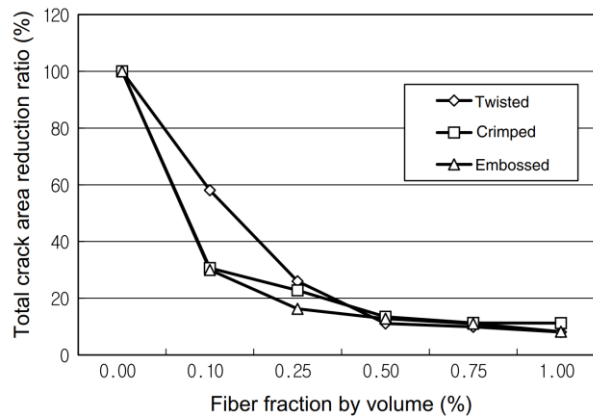


Figura 3.12: Reducción de área agrietada por contracción plástica en función del contenido y geometría de fibras PET recicladas [27].

Adicionalmente, en la Figura 3.13 se exhiben los patrones de agrietamiento observados en muestras reforzadas específicamente con fibras con relieve. Se aprecia una reducción visual en la cantidad y severidad de las fisuras conforme aumenta el contenido de refuerzo, observándose únicamente fisuras

finas y dispersas en mezclas con un 1% de fibras. Además, a partir de dosificaciones iguales o superiores al 0,25%, las grietas tienden a concentrarse en las zonas con restricción de movimiento, lo que refleja un cambio en el patrón de fisuración asociado a la acción de las fibras, las cuales limitan la propagación de grietas en las zonas no restringidas.

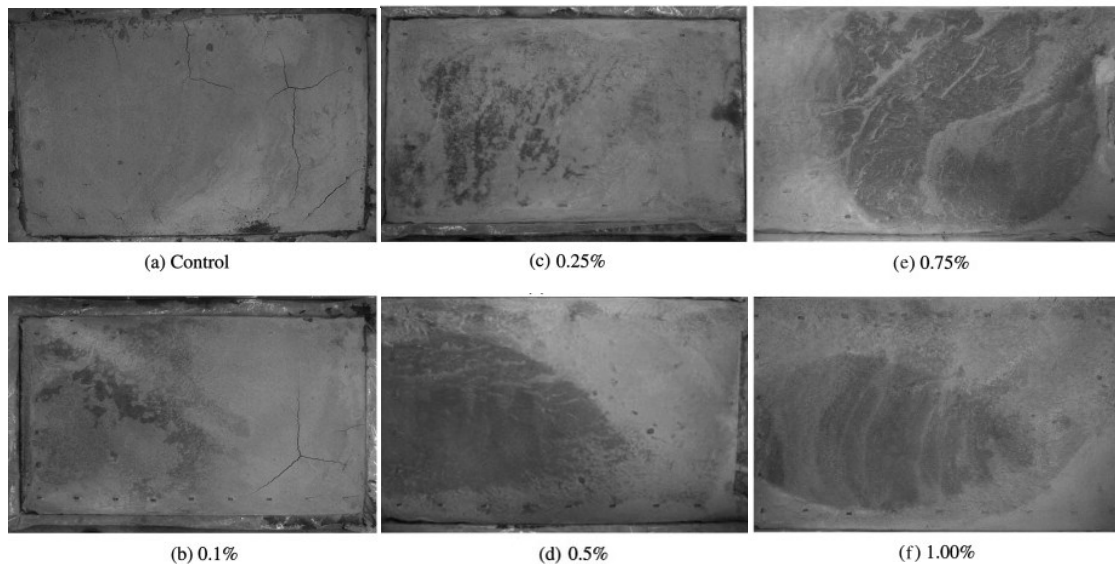


Figura 3.13: Patrones de agrietamiento por contracción plástica en paneles de mortero reforzados con fibras PET con relieve, en varias fracciones volumétricas: (a) Control, (b) 0,1%, (c) 0,25%, (d) 0,5%, (e) 0,75%, (f) 1,00%. [27].

Resultados similares fueron reportados en [31], donde se evidenció que fibras de PET de 50 mm de longitud ofrecen un control del agrietamiento significativamente más eficaz que contrapartes de 30 mm. Con una fracción volumétrica del 1 %, las fibras más largas permitieron alcanzar reducciones del área fisurada de hasta un 92,6 %, logrando reducir el ancho de las grietas, que en la mezcla control alcanzaban los 3 mm, hasta valores inferiores a 0,5 mm en las mezclas reforzadas.

En cuanto a la contracción por secado, se ha comprobado que el uso de fibras R-PET permite limitar eficazmente la formación de grietas en elementos con restricción de movimiento. Ensayos específicos, como el ensayo de anillo, donde el material se coloca alrededor de un anillo metálico que restringe su deformación, han demostrado que, con una dosificación del 1 % en volumen y longitudes de 50 mm, es posible evitar completamente la fisuración tras 28 días de secado, mientras que mezclas sin refuerzo o con menor contenido presentaron fallas tempranas. Además, se ha observado que el aumento en el contenido de fibras retrasa significativamente el inicio de fisuración en condiciones de contracción libre, reflejando una mayor capacidad del material para redistribuir las tensiones internas y reducir la concentración de esfuerzos críticos [10] [31].

3.5 Otras características estudiadas

La porosidad y, por lo tanto, la calidad de una mezcla endurecida de hormigón comúnmente es evaluada mediante ensayos no destructivos como la prueba de pulso ultrasónico (UPV). En el estudio de Sayı y Eren [42], se observó una leve disminución en la velocidad de propagación del pulso ultrasónico en muestras reforzadas con fibras recicladas de PET, lo que sugiere la presencia de huecos adicionales dentro de la matriz. Estos defectos producidos se pueden atribuir a la hidrofobicidad del material plástico y a una posible deficiencia en la adherencia fibra-matriz. No obstante, los autores señalan que esta variación no compromete gravemente la calidad del material, ya que los valores de UPV siguen cumpliendo con los requisitos normativos. Complementariamente, Mohammed y Karim [37], observaron que el efecto de la longitud de la fibra también incide en la calidad interna del material: mientras que fibras cortas (10 mm) tienden a reducir la UPV, las fibras más largas (20 y 40 mm) mostraron un aumento en la velocidad de pulso, particularmente en dosificación del 0,5%, lo que se asocia a una mejor compactación de la mezcla.

Asimismo, ensayos de permeabilidad al agua reportados [42] mostraron un incremento considerable en la profundidad de penetración, especialmente en mezclas con contenidos de fibra superiores al 1%. Aunque este aumento de porosidad puede comprometer la durabilidad frente a agentes agresivos, los autores destacan que su impacto dependerá del equilibrio entre la generación de vacíos y el efecto de puenteo de las fibras. Además, se observaron otras modificaciones físicas derivadas del uso de fibras R-PET, como una menor densidad aparente del hormigón —atribuida tanto a la baja densidad del polímero como a la presencia de huecos— y una mayor permeabilidad, esto último podría resultar beneficioso en aplicaciones específicas como pavimentos drenantes u hormigones porosos.

Finalmente, la durabilidad de las fibras PET en medios alcalinos ha sido respaldada por algunos estudios. Se ha demostrado que estas fibras conservan prácticamente la totalidad de su resistencia mecánica tras una exposición prolongada a soluciones alcalinas, confirmando su estabilidad química en entornos cementicios [12]. Cabe señalar que la alcalinidad del hormigón se origina por la presencia de hidróxidos de sodio y potasio en el cemento, los cuales, en presencia de humedad, pueden reaccionar con áridos silíceos reactivos generando entornos agresivos que pueden comprometer la durabilidad ciertos tipos de fibras. De forma complementaria, Fraternali *et al.* [43] observaron que, tras 12 meses de inmersión en agua salina, especímenes de hormigón reforzado con fibras PET mantuvieron su resistencia a compresión y a primera fisura, aunque con una reducción significativa en la tenacidad post-fisura.

CAPÍTULO 4

Discusión: Fibras R-PET en el hormigón

4.1 Resumen de casos de estudio

Se revisaron resultados de un total de 16 estudios, los cuales fueron considerados para evaluar las tendencias en la resistencia a compresión y a flexión del hormigón reforzado con fibras de R-PET. Los datos recopilados se presentan en el Anexo A. Se incluyeron únicamente aquellos estudios que especifican que las muestras de hormigón fueron evaluadas tras 28 días de curado, y cuyos resultados corresponden al promedio aritmético de al menos tres especímenes ensayados bajo las mismas condiciones.

En general, los estudios analizados emplean un procedimiento similar para el tratamiento y fabricación de las fibras, el cual incluye la reutilización de botellas plásticas postconsumo, la limpieza del material y el posterior corte manual para obtener las fibras. En un par de estudios puntuales, las fibras se obtienen a partir de monofilamentos fabricados mediante extrusión, los cuales luego son cortados a la longitud deseada. No obstante, estos casos también son considerados válidos dentro del análisis, ya que la materia prima sigue siendo botellas de PET recicladas. El espesor de las fibras utilizadas resulta prácticamente idéntico en todos los casos revisados, determinado por el grosor original de las botellas, el cual es del orden de 0,25 mm.

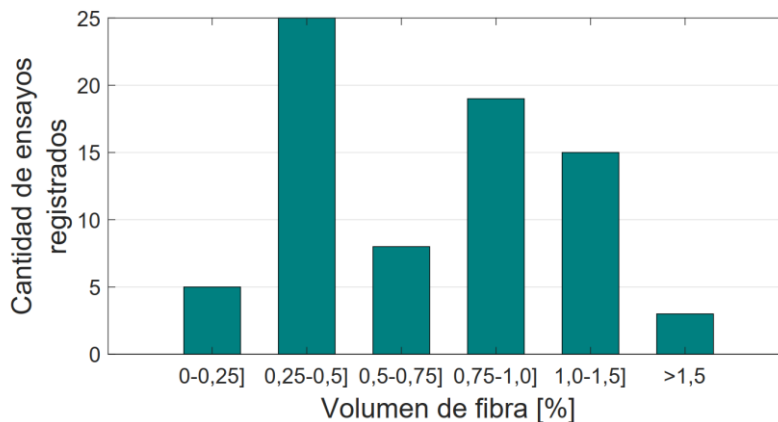


Figura 4.1: Distribución de ensayos por volumen de fibras de refuerzo. Datos recopilados de los estudios: [10], [12], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [39], [40], [45], [49], [60], [61].

Los estudios revisados examinan dosificaciones de fibras que varían desde un volumen mínimo de 0,15% hasta un máximo de 3%, concentrándose la mayoría de las pruebas en hormigones reforzados con volúmenes de 0,5% y 1,0%. (Figura 4.1). Dosificaciones menores no suelen ser probadas debido

al poco impacto que significan como refuerzo, mientras que proporciones mayores tampoco, pues pueden generar efectos no deseados, derivados del fenómeno de saturación de la matriz, lo que afecta negativamente las propiedades mecánicas y la trabajabilidad del material.

4.1.1 Tendencias en la resistencia del hormigón con respecto al volumen de fibras R-PET

El gráfico de la Figura 4.2 muestra la dispersión de los datos correspondientes a la variación porcentual de la resistencia máxima a compresión del hormigón en función de la fracción volumétrica de fibra añadida. La tendencia general no es del todo definida y presenta una importante dispersión, observándose disminuciones de resistencia de hasta un -37% y al mismo tiempo incrementos significativos, del orden del 20% al 24%.

Al detenerse en estos casos extremos, se identifica que los incrementos están asociados a mezclas reforzadas con fibras de geometrías particulares que favorecen el anclaje dentro de la matriz, en el caso de las mejoras. Por otro lado, las mayores reducciones de resistencia se presentan en hormigones de alta resistencia base, con una baja relación agua/cemento, cuya mezcla densa y homogénea se vio más perjudicada con la incorporación de fibras, posiblemente por los problemas asociados a la compactación y a la formación de zonas débiles en la interfaz.

También se observa que, a partir de fracciones volumétricas superiores al 1,0 %, la tendencia general son disminuciones evidentes en la resistencia a la compresión.

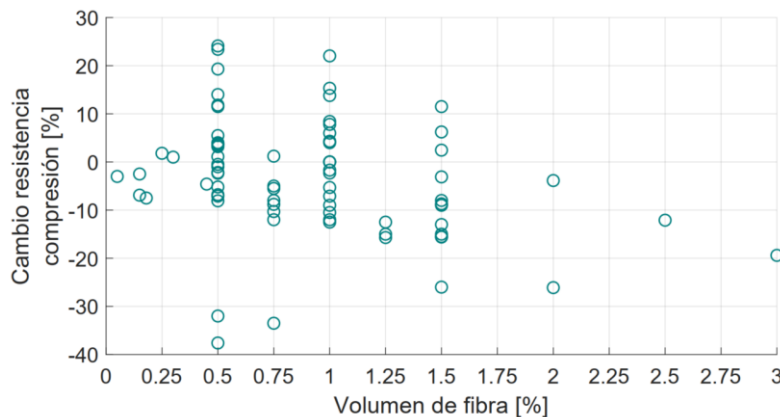


Figura 4.2: Gráfica dispersión de datos cambio resistencia compresión vs volumen de fibras. Datos recopilados de: [10], [12], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [39], [40], [45], [49], [60], [61].

Si se consideran únicamente los casos en los que la variación en resistencia a compresión se mantiene dentro del rango de $\pm 15\%$, los mejores resultados promedio se registran con un volumen de fibra del 0,5%, registrándose una mejora promedio del 1,27%. En contraste, con volúmenes de 1% y 1,5% se obtiene en promedio una merma de la resistencia en compresión de un -2,69% y -4,07%

respectivamente. Estos datos son graficados en la Figura 4.3, donde además se incluye para efectos ilustrativos una línea de tendencia lineal que permite visualizar el comportamiento general de los datos. Si se estima el coeficiente de determinación R^2 es de 0,06, lo que sugiere que no existe una relación lineal fuerte.

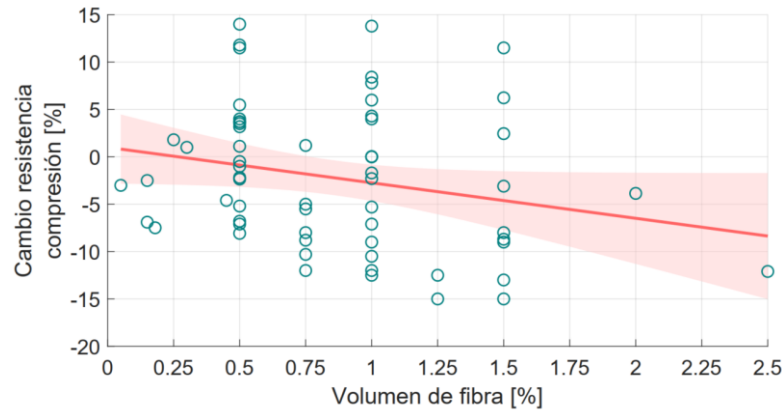


Figura 4.3: Tendencia variación resistencia a compresión (rango $\pm 15\%$.) vs volumen de fibra PET. Datos recopilados de: [10], [12], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [39], [40], [49], [60], [61].

Por otra parte, al observar la distribución de los datos de comportamiento en flexión representados en la Figura 4.4, se advierte que en volúmenes de fibra superiores al 1 % no se observa una tendencia decreciente; por el contrario, en dosificaciones cercanas al 1,5 % se registran múltiples incrementos. El valor más alto registrado (99%) corresponde a especímenes reforzados con fibras de geometría circular, combinadas además con la incorporación de un compuesto complementario, como el humo de sílice en reemplazo parcial de cemento. Esta combinación probablemente favoreció la adherencia y el comportamiento sinérgico entre la matriz y las fibras. Por otro lado, los valores más desfavorables se observan nuevamente en mezclas con baja relación agua/cemento (0,35).

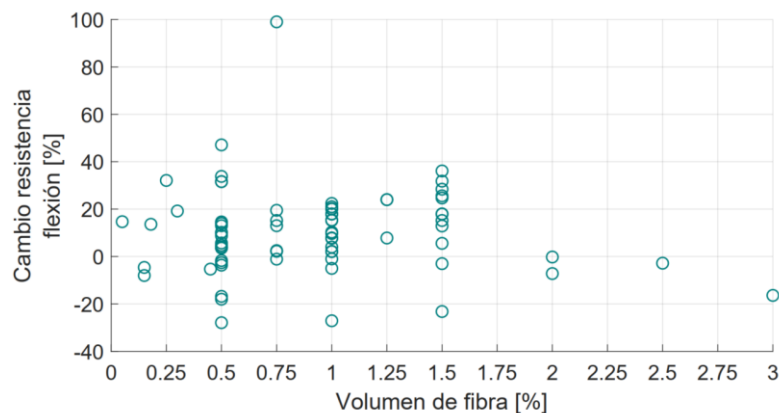


Figura 4.4: Gráfica dispersión de datos cambio resistencia flexión vs volumen de fibras. Datos recopilados de: [12], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [39], [40], [45], [49], [60], [61].

Si se filtran los resultados de la variación de flexión en un rango de entre -20% y +30% (Figura 4.5). Se tiene que en promedio la mejor resistencia se logra con un volumen de fibras de 1,5%, aumentando en un +16,14%. Para otras dosificaciones como 0,5% y 1%, mejora en promedio 3,15% y 11,05% respectivamente. Estos valores resultan más favorables que los observados en compresión para los mismos niveles de refuerzo, lo que sugiere que una mayor presencia de filamentos tiende a mejorar el control de grietas y a incrementar la capacidad resistente del hormigón frente a esfuerzos de flexión.

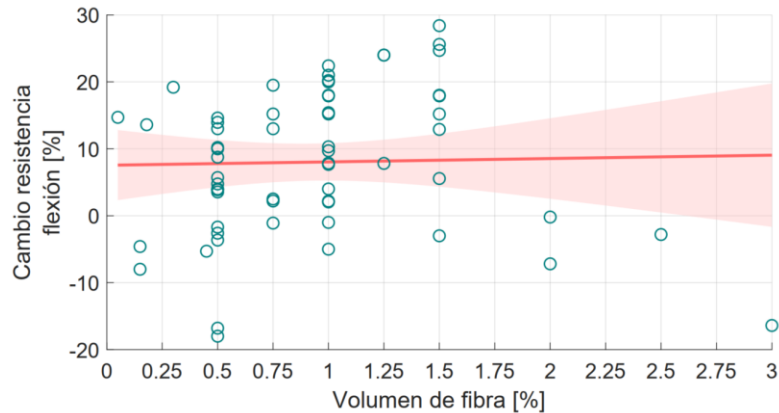


Figura 4.5: Tendencia variación resistencia flexión (rango -20% a 30%.) vs volumen de fibra PET. Datos recopilados de estudios: [12], [30], [31], [32], [34], [35], [36], [37], [39], [45], [49], [60].

La variabilidad observada indica que el porcentaje de fibras no constituye, por sí solo, el factor predominante en el comportamiento del hormigón. Múltiples variables adicionales pueden influenciar en la respuesta mecánica de las muestras, tales como la calidad del cemento, la resistencia base del hormigón, la granulometría, el tipo y tamaño de los agregados, su contenido de humedad, así como las propiedades intrínsecas del plástico reciclado utilizado y la geometría de las fibras. Todos estos factores pueden afectar, entre otros aspectos, el nivel de porosidad de la mezcla, lo que repercute directamente en la calidad de la adherencia entre las fibras y la matriz cementicia. En consecuencia, el rendimiento de las fibras no es uniforme en todas las condiciones. Un hormigón menos compacto, por ejemplo, puede facilitar el desprendimiento de las fibras, mientras que uno de mayor densidad podría generar un anclaje excesivo, provocando la fractura de la fibra antes de su extracción, lo que tampoco representa un comportamiento óptimo.

Además, se puede evidenciar que las correlaciones típicas entre el comportamiento en compresión y en flexión, válidas para hormigones convencionales, no se aplican de forma directa en mezclas reforzadas con fibras. En muchos casos, a pesar de observarse una merma en la resistencia a compresión, el desempeño en flexión se ve igualmente favorecido.

En general, y de acuerdo con la revisión de los datos realizada, se puede concluir que una fracción volumétrica de fibra PET del 1 % representa, en la mayoría de los casos analizados, una dosificación óptima. Esta proporción permite mejorar el comportamiento en flexión sin comprometer de manera

significativa la resistencia a compresión. Además, tal como se revisó en el capítulo anterior, dosificaciones similares favorecen la absorción de energía tras la fisuración, mejora el control de agrietamiento por contracción y no condiciona la docilidad de la mezcla notablemente.

4.1.2 Tendencias en la resistencia del hormigón con respecto a la longitud de fibras R-PET

De forma análoga, se generaron gráficos que relacionan la longitud de las fibras con el comportamiento en compresión y flexión del hormigón reforzado, considerando específicamente los resultados obtenidos a partir de dosificaciones dentro del rango entre 0,5 % y 1,5 % en volumen (Figura 4.6 y Figura 4.7). Para este análisis, se incluyeron únicamente fibras con geometría de filamento alargado, excluyendo aquellas de forma circular.

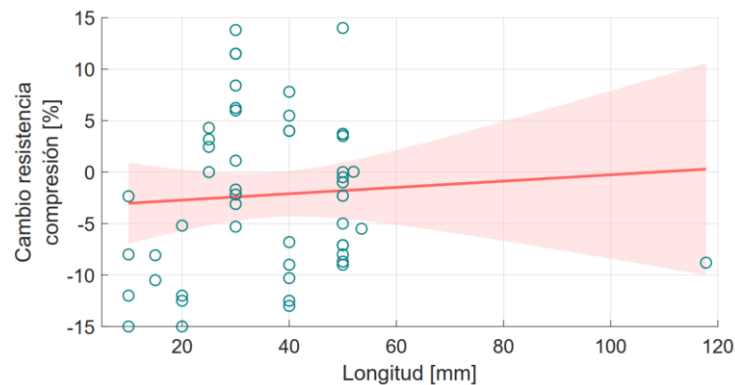


Figura 4.6: Tendencia resistencia compresión vs longitud fibra PET (0,5% - 1,5% volumen). Datos recopilados de estudios: [10], [12], [31], [32], [33], [35], [37], [39], [49], [60], [61].

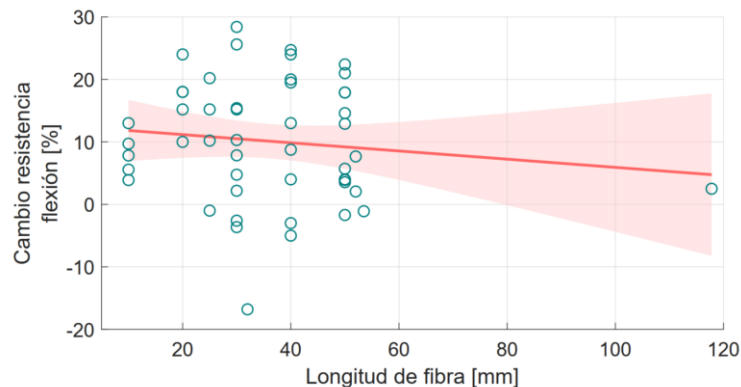


Figura 4.7: Tendencia resistencia flexión vs longitud fibra PET (0,5% - 1,5% volumen). Datos recopilados de estudios: [12], [30], [31], [32], [34], [35], [37], [39], [49], [60].

A partir de los datos analizados, se determina que, en compresión, la longitud de fibra que proporciona el mejor rendimiento corresponde a 30 mm, registrando una mejora promedio de +4,21%. En tanto, en flexión, la longitud óptima es de 20 mm, con una mejora promedio de +17,04%. No obstante, este último promedio se basa en solo 4 datos, mientras que el segundo mejor rendimiento, que indica una mejora de +11,77% y que corresponde a una longitud de 40 mm, se sustenta en un conjunto de datos bastante mayor, lo que le otorga mayor solidez estadística.

Si bien tampoco se observa una correlación importante, las fibras más cortas tienden a ofrecer un mejor rendimiento en compresión, mientras que las más largas resultan más eficientes frente a esfuerzos de tracción, representados por los ensayos de flexión, debido a su mayor capacidad de anclaje. Este efecto, aunque podría aportar beneficios en compresión, no siempre se traduce en mejoras significativas, siendo más efectivo en flexión, donde permite un mejor control de fisuras y un comportamiento más dúctil del material, gracias a una mayor superficie de contacto efectivo entre la fibra y la matriz, que favorece la transferencia de esfuerzos.

Dentro de las limitaciones de este análisis, la más relevante corresponde a la no consideración de la relación de aspecto dentro de la geometría de la fibra. No obstante, algunos investigadores han señalado que la longitud de la fibra ejerce una influencia más significativa que su sección transversal en el rendimiento del hormigón [32].

Como comentario general, aunque en flexión se observan mejoras porcentuales más altas, los resultados presentan una mayor variabilidad (evaluado mediante coeficiente de determinación R^2). En cambio, en compresión los cambios son más moderados, pero tienden a ser más consistentes. Esta diferencia sugiere que los comportamientos frente a flexión van a ser más sensibles a una combinación de variables adicionales.

A modo de síntesis, la Tabla 4.1 presenta los parámetros óptimos estimados a partir del análisis de los estudios revisados, diferenciando entre el comportamiento en compresión y en flexión, e identificando los valores de volumen y longitud de fibra PET que, en promedio, ofrecieron el mejor desempeño para cada tipo de sollicitación mecánica en el hormigón.

Tabla 4.1: Parámetros óptimos estimados de volumen y longitud de fibra PET según tipo de sollicitación mecánica.

	Volumen óptimo [%]	Longitud óptima [mm]
Comportamiento compresión	0,5	30
Comportamiento flexión	1,5	40

CAPÍTULO 5

Losas apoyadas sobre terreno reforzadas con fibras

5.1 Losas apoyadas sobre terreno

Las losas de hormigón apoyadas sobre terreno son un tipo construcción muy común que se caracterizan por estar directamente asentado sobre una subrasante compactada o una base granular. En este sistema, las cargas aplicadas sobre la losa se transmiten al suelo de apoyo a través del propio hormigón, que actúa como medio de distribución hacia la subrasante. Pueden diseñarse para resistir distintos tipos de solicitaciones, incluyendo cargas distribuidas, cargas puntuales (como las generadas por ruedas de vehículos), y efectos derivados de la contracción, variaciones térmicas u otras condiciones ambientales. Gracias a su versatilidad y resistencia, se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde pavimentos residenciales simples hasta pisos industriales de alta resistencia.

Dado que este tipo de construcciones abarca amplias superficies, son especialmente susceptibles a agrietamientos provocados por contracciones plásticas y por secado [11]. Por esta razón, el uso de refuerzos es común en su diseño, ya que, además de contribuir a la capacidad de soportar las cargas aplicadas, ayudan a controlar la formación de grietas y a limitar el ancho de las fisuras mediante una adecuada redistribución de los esfuerzos.

Los refuerzos típicos comprenden barras de acero, mallas electrosoldadas y más recientemente se han incorporado fibras metálicas y sintéticas. La malla de acero proporciona un refuerzo bidimensional en una ubicación específica dentro del espesor de la losa, mientras que el refuerzo con fibras ofrece un refuerzo tridimensional, homogéneamente distribuido a lo largo de toda la sección del elemento.

Además, el uso de refuerzos permite ampliar el espaciamiento de juntas de control, que son intervalos planificados que dividen grandes superficies de hormigón en secciones más pequeñas. Estas juntas inducen de manera controlada la aparición de grietas en zonas específicas, minimizando así la formación aleatoria de fisuras en la superficie.

5.2 Losas reforzadas con fibras

Aunque la evidencia del uso de fibras de R-PET en este tipo de construcciones es escaso, es posible establecer un marco de referencia tomando como base el comportamiento de fibras comerciales ya consolidadas, como las metálicas o sintéticas. En particular, las fibras de acero fueron de las primeras en emplearse como alternativa al refuerzo convencional, lo que ha dado lugar a una mayor y más temprana cantidad de investigaciones sobre su desempeño en losas de hormigón [44] [62].

Como ejemplo representativo, Feng Shi *et al.* [46] hicieron ensayos en losas apoyadas sobre terreno, de dimensiones de 1800x1800x120 mm, con el propósito de comparar el comportamiento bajo cargas concentradas con distintos tipos de refuerzo: fibras sintéticas de polipropileno, fibras de acero y malla de acero. Las pruebas consistieron en aplicar una carga vertical centrada hasta la falla del elemento (Figura 5.1), mientras se registraban las deflexiones y deformaciones internas. La falla fue identificada por la aparición de fisuras superficiales en la cara superior del hormigón, en la zona de aplicación de carga, asociadas al desarrollo de esfuerzos de tracción generados por el momento flector inducido.

Los resultados mostraron que la incorporación de fibras sintéticas en una dosificación de 6 kg/m³, fibras metálicas en 30 kg/m³ y malla de acero con barras de 6 mm de diámetro, incrementaron la resistencia al agrietamiento inicial de las losas en un 28 %, 47 % y 79 %, respectivamente, en comparación con una losa sin refuerzo.

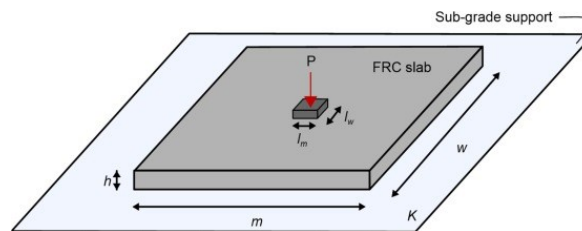


Figura 5.1: Prueba de carga concentrada en losa apoyada sobre terreno.

La curva carga–deflexión obtenida en los ensayos (Figura 5.2) refuerza esta diferencia en el comportamiento estructural de los refuerzos: mientras las losas con malla de acero presentan una mayor rigidez inicial (curva verde), las reforzadas con fibras sintéticas muestran una respuesta más gradual y dúctil (curva roja), manteniendo su capacidad portante incluso tras la aparición de fisuras. Este tipo de desempeño resulta especialmente valioso en aplicaciones donde el control del agrietamiento y la absorción de energía cobran mayor relevancia que la resistencia última.

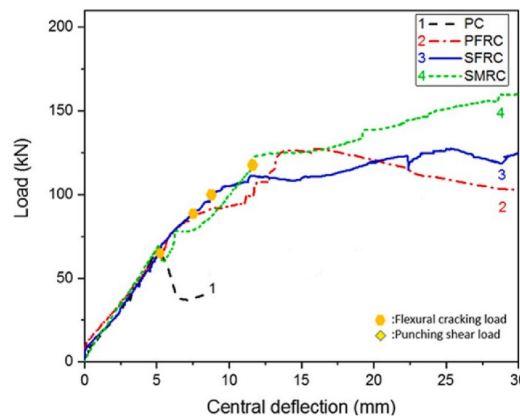


Figura 5.2: Curvas carga–deflexión de losas apoyadas con diferentes tipos de refuerzo [46].

Vale la pena rescatar algunos resultados de ensayos hechos con una configuración de losas simplemente apoyadas reforzadas con fibras R-PET que, si bien responden de forma distinta a las losas sobre terreno, permiten aislar el efecto del refuerzo sin la influencia del suelo. En esta línea, De Silva y Prasanthan [49] ensayaron paneles de $500 \times 500 \times 100$ mm reforzados mediante una combinación de fibras R-PET (1 % en volumen, 50 mm de longitud) y armadura de acero. La incorporación de fibras mejoró significativamente la resistencia al impacto, con un aumento del 132 % en el número de golpes requeridos hasta la primera fisura, así como una mayor capacidad de disipación de energía y una respuesta vibratoria más favorable respecto a la losa reforzada solo con acero. Sin embargo, se observó una disminución del 43.5 % en la carga última, aunque acompañada de un comportamiento más dúctil.

Por su parte, Rasheed *et al.* [33], desarrollaron un estudio similar utilizando paneles de losa delgada (50 mm de espesor) bajo carga puntual, incorporando fibras R-PET en proporciones entre 0.5 % y 2.0 % en volumen. Los paneles contaban además con una armadura de barras de acero de 5 mm de diámetro, configurando un sistema de refuerzo mixto. La dosificación del 1.5 % presentó el mejor desempeño global, con un aumento del 92.7 % en la energía absorbida (ver Figura 5.3) y un incremento del 38 % en el índice de ductilidad respecto al hormigón sin fibras.

En conjunto, los resultados respaldan el uso de fibras PET recicladas como un refuerzo técnicamente eficaz en losas de baja exigencia estructural, con aportes concretos en tenacidad, control de fisuración y desempeño postfisura. Estas evidencias permiten avanzar en la evaluación de su factibilidad como alternativa parcial o total al acero en este tipo de aplicaciones.

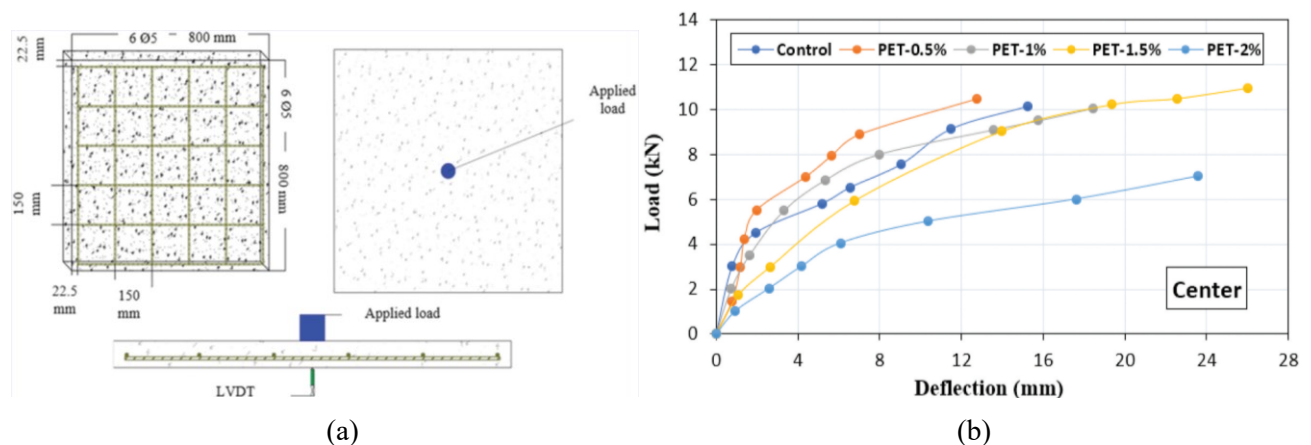


Figura 5.3: (a) Configuración ensayo de carga puntual sobre paneles de hormigón armado reforzados con fibras PET recicladas. (b) Curvas carga–deflexión.

5.3 Conceptos de diseño con hormigón reforzado con fibras

Si se considera la sección transversal de hormigón reforzado con fibras, como se muestra en la Figura 5.4, en base al equilibrio de fuerzas, el momento de flexión nominal de dicha sección M_{n-HRF} estará dado por la ecuación (4). Es de notar que, en este modelo simplificado, se asume que todas las fuerzas de compresión son absorbidas exclusivamente por el hormigón, mientras que las fuerzas de tracción son resistidas por el material compuesto (con fibras). Para efectos de diseño en el estado límite último, se considera que la resistencia a la tracción residual del HRF f_{ut-HRF} es igual al 37 % de la resistencia a la flexión equivalente $f_{e,3}$ [21].

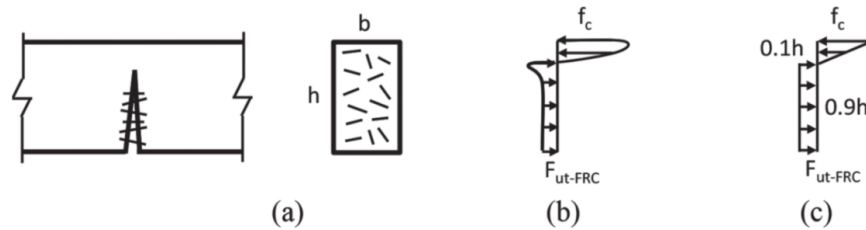


Figura 5.4: Esquema del bloque de esfuerzos en un elemento de HRF fisurado en flexión. (a) Sección de viga HRF; (b) Distribución real de esfuerzos normales; (c) Distribución simplificada de esfuerzos normales [21].

$$M_{n-HRF} = f_{e,3} \cdot \frac{b h^2}{6} \quad (4)$$

$$f_{ut-HRF} = 0,37 \cdot f_{e,3} \quad (5)$$

El parámetro $f_{e,3}$ se obtiene a partir del ensayo de flexión a cuatro puntos según la norma ASTM C1609 [50], realizado sobre una viga prismática reforzada con fibras. Este ensayo permite caracterizar el comportamiento posfisuración del material mediante la curva carga–deflexión obtenida durante el ensayo controlado por deformación.

En la curva típica resultante (Figura 5.5), se distinguen dos resistencias relevantes: la primera corresponde al valor de carga P_1 , alcanzado al momento de producirse la primera fisura, y representa la resistencia máxima a la flexión del hormigón sin fibras. La segunda resistencia se evalúa a una deflexión central específica, comúnmente igual a $L/150$, donde L es la luz de la viga entre los apoyos. Esta carga, denotada P_{150} , está asociada al comportamiento postfisura proporcionado por las fibras. A partir del área bajo la curva entre ambos puntos se calcula la tenacidad T_{150} , y de este valor se determina la resistencia equivalente a la flexión $f_{e,3}$, mediante la expresión (6). Por otro lado, la resistencia a la flexión del hormigón sin fibras f_r se calcula según (7).

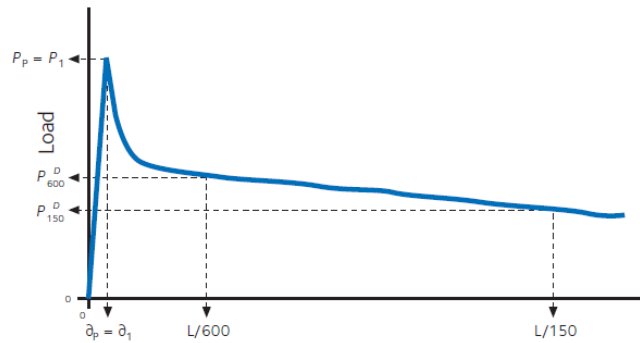


Figura 5.5: Curva carga – deflexión típica de ensayo de flexión en viga prismática según ASTM C1609 [50].

$$f_{e,3} = \frac{1000 T_{150} L}{3bh^2} \quad (6)$$

$$f_r = \frac{P_1 L}{bh^2} \quad (7)$$

Finalmente, se obtiene el parámetro $R_{e,3}$, que representa la relación de resistencia residual equivalente, que se determina según la ecuación (8). Este parámetro permite cuantificar el aporte real de las fibras al comportamiento postfisura del hormigón, expresado como porcentaje respecto a la resistencia del hormigón sin fibras.

$$R_{e,3} = \frac{f_{e,3}}{f_r} \quad (8)$$

Retomando el modelo de bloque simplificado mostrado previamente en la Figura 5.4, la capacidad reducida de momento de la sección ($\varphi' \cdot M_{n-HRF}$), llamada momento de diseño, deberá ser mayor o igual al momento flector solicitante M_u , generado por las cargas externas. El factor de reducción de resistencia φ' depende del tipo de elemento y aplicación según norma, y generalmente toma valores entre 0,7 y 0,9 [51].

$$\varphi' \cdot M_{n-HRF} \geq M_u \quad (9)$$

En el diseño de losas de hormigón apoyadas sobre terreno, como la que se muestra en la Figura 5.6, se generan momentos flectores positivos y negativos cuando se aplica una carga puntual centrada. Históricamente, el diseño de estos elementos —incluso cuando están reforzados con fibras— se ha basado en teorías clásicas como la de Westergaard, que asume un comportamiento elástico del

hormigón y considera cualquier fisura como una falla estructural. Sin embargo, este enfoque no representa adecuadamente el comportamiento del hormigón reforzado con fibras, especialmente frente a cargas de servicio, retracción o variaciones térmicas.

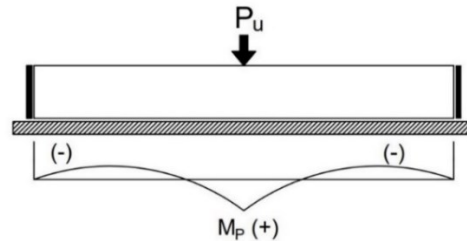


Figura 5.6: Modelo de losa con apoyo continuo sometida a una carga puntual centrada.

Por ello, documentos como el ACI 360R [52] y la TR34 [53] han incorporado métodos de análisis más representativos, como la teoría de la línea de fluencia. En particular, el modelo propuesto por Meyerhof permite estimar la capacidad última de una losa considerando su comportamiento como una placa plástica rígida sobre una subrasante elástica. Este enfoque distingue entre distintas condiciones de carga (centro, borde y esquina), cada una con un mecanismo de rotura propio, y permite calcular tanto el momento resistente como la carga última aplicable. La carga última P_0 se determina mediante expresiones basadas en líneas de fluencia, como la ecuación (10), la cual depende del radio de rigidez relativa l , definido en la ecuación (11) a partir de las propiedades del material y el espesor de la losa.

Para una carga central:

$$P_0 = 6 \left[1 + \frac{2a}{l} \right] \quad (10)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}} \quad (11)$$

En conjunto, estos fundamentos permiten incorporar el hormigón reforzado con fibras dentro de marcos de diseño basados en desempeño, particularmente en elementos donde la redistribución de esfuerzos y la capacidad posfisura resultan relevantes.

5.4 Diseño con refuerzo tradicional y posibilidad de reemplazo

En esta sección se presenta el modelo clásico de refuerzo mediante barras o mallas de acero, comúnmente utilizado en elementos de hormigón armado. A partir del equilibrio de fuerzas en la sección transversal, ilustrado en la Figura 5.7, el momento flector nominal M_{RC} se determina según la ecuación (12). Una vez que el hormigón se fisura, su capacidad de tracción se considera despreciable,

por lo que la totalidad de la tracción es soportada por el acero, mientras que la compresión es absorbida por el hormigón.

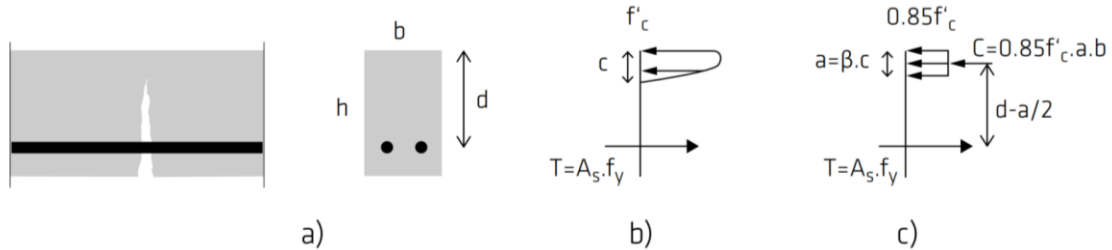


Figura 5.7: Esquema del bloque de esfuerzos en un elemento de hormigón armado fisurado en flexión sin fibras. (a) Sección de viga de hormigón armado; (b) Distribución real de esfuerzos normales; (c) Distribución simplificada de los esfuerzos normales [21].

$$M_{n-RC} = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (12)$$

donde:

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0.85 f'_c \cdot b} \quad (13)$$

En las losas de hormigón apoyadas directamente sobre terreno, el refuerzo de acero puede cumplir con múltiples funciones, siendo la más común el control de fisuración por contracción, temperatura y asentamientos diferenciales. Si bien en muchas aplicaciones su participación estructural es limitada debido a la colaboración del terreno como apoyo continuo, en otros casos —como bajo cargas concentradas o condiciones de borde desfavorables— el refuerzo sí puede asumir una función estructural secundaria.

La cantidad de refuerzo puede expresarse mediante la cuantía de acero ρ , definida en la ecuación (14), en donde, A_s es el área de sección transversal del acero por metro lineal y A_c es el área de hormigón correspondiente.

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = \frac{A_s}{bh} \quad (14)$$

Según la cuantía adoptada y su finalidad, se pueden distinguir distintos niveles de refuerzo, tal como se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Clasificación del nivel de refuerzo en losas de hormigón según la cuantía de acero ρ .

Nivel de refuerzo	Rango de ρ	Aplicación
Mínimo – contracción plástica	$\rho < 0,05\%$	Prevención de fisuras tempranas
Básico – contracción por secado / temperatura	$0,05\% < \rho < 0,10\%$	Control de fisuración superficial
Bajo nivel de momento	$0,10\% < \rho < 0,50\%$	Control de agrietamiento
Nivel medio de momento	$0,35\% < \rho < 0,70\%$	Refuerzo estructural moderado
Alto nivel de momento	$\rho > 0,7\%$	Refuerzo estructural significativo

En este marco, el Portland Cement Association (PCA) sugiere como criterio general una cuantía mínima del orden de 0,1% del área de hormigón, orientada a limitar la fisuración por retracción en losas sin exigencias estructurales significativas [54].

Este valor puede servir como referencia práctica para establecer una equivalencia funcional entre la cuantía de acero tradicional y la resistencia residual aportada por las fibras. Para cuantificar dicha equivalencia, se emplean indicadores como la resistencia equivalente a flexión $f_{e,3}$ o la relación de resistencia residual $R_{e,3}$, obtenidos mediante pruebas estandarizadas. Estos parámetros permiten verificar si una determinada dosificación de fibras puede replicar el desempeño del refuerzo convencional en términos de control de agrietamiento.

CAPÍTULO 6

Propuesta de diseño

A continuación, se presenta el diseño conceptual de una losa de hormigón cuyo objetivo es evaluar la incorporación de fibras de PET recicladas como alternativa al refuerzo tradicional. Este tipo de losa es representativo de aplicaciones habituales en entornos residenciales y urbanos, tales como pisos de viviendas, zonas de tránsito peatonal o superficies destinadas a estacionamientos para vehículos livianos.

Para efectos del análisis, se considera un paño de losa de 25 x 25 metros de superficie y 120 mm de espesor, dimensiones comunes en este tipo de uso. Con el fin de estudiar el desempeño técnico, económico y ambiental de la incorporación de fibras, se plantean dos escenarios comparativos:

- Escenario 1: Losa con refuerzo convencional de acero, diseñado para limitar el agrietamiento inducido por contracción y variaciones térmicas.
- Escenario 2: Losa reforzada con fibras de PET recicladas, con el objetivo de lograr un efecto equivalente en el control de fisuración.

6.1 Diseño de mezcla de hormigón

El análisis parte de una mezcla de hormigón base, sobre la cual se evalúan las distintas estrategias de refuerzo consideradas en esta propuesta. Esta mezcla es representativa de aplicaciones residenciales y urbanas. En la Tabla 6.2 se detallan las proporciones, expresadas en kilogramos, de cada componente de la mezcla por metro cúbico de hormigón. Cabe destacar que, en el caso de hormigones reforzados con fibras, se recomienda emplear un agregado grueso con un diámetro nominal no superior a 20 mm, pues esto favorecer la distribución de las fibras. También en la Tabla 6.1 se resumen las condiciones de diseño de la losa de hormigón.

Tabla 6.1: Características de diseño losa de hormigón.

Característica	Valor
Superficie [m ²]	625
Espesor [mm]	120
Volumen total hormigón [m ³]	75
Resistencia diseño mezcla hormigón [Mpa]	25

Tabla 6.2: Proporciones de materiales del diseño de mezcla de hormigón.

Material	Proporción en mezcla [kg/m ³]
Cemento	383
Arena	672
Agregado grueso	1100
Relación agua/cemento	0,6

6.2 Caso 1: Losa reforzada con malla de acero

En primer lugar, se adopta una cuantía de refuerzo equivalente de referencia $\rho = 0,1$. Tal como se indicó en la sección 5.4, este valor es recomendado para controlar los efectos de la contracción por secado, limitando la formación y apertura de fisuras en la losa. Para cumplir con este requerimiento se contempla el uso de una malla electrosoldada de disponibilidad comercial, la cual será evaluada para verificar que su cuantía es suficiente.

En este caso, se selecciona una malla C139, elaborada con acero trefilado AT56-50H, compuesta por varillas de de $\varnothing 4,2$ mm diámetro dispuestas cada @100 mm en ambas direcciones. Esta configuración proporciona un área de refuerzo $A_s = 138,54$ mm²/m, lo que corresponde a una cuantía de refuerzo:

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = \frac{138,54}{1000 \cdot 120} = 0,115\%$$

Este valor supera levemente el mínimo adoptado, por lo que resulta adecuado para el propósito de control de fisuración.

En términos constructivos, se considera que la malla debe colocarse en el tercio superior del espesor de la losa, posición que favorece la contención de las fisuras por retracción y temperatura en la zona más expuesta a estos efectos [52].

6.3 Caso 2: Losa reforzada con fibras R-PET

En este escenario se analiza la posibilidad de reemplazar el refuerzo convencional de acero por fibras de PET recicladas, con el objetivo de lograr un desempeño equivalente en términos de control de fisuración.

Para estimar la dosificación adecuada de fibras que permita alcanzar un nivel de desempeño comparable al caso con malla de acero, ubicada en el tercio superior del espesor de la losa, se emplea

la correlación empírica propuesta por Meza *et al.* [34], desarrollada a partir de ensayos experimentales de flexión en hormigón con incorporación de fibras R-PET. Dicha correlación, permite estimar el parámetro $R_{e,3}$, —relación de resistencia residual equivalente— como función de la dosis de fibras (Dos), expresada en kilogramos por metro cúbico, según la ecuación (15):

$$R_{e,3} = 0,317 + 0,0101 \cdot Dos \quad (15)$$

Dado que en el caso con refuerzo de acero se obtuvo una cuantía de $\rho = 0,115\%$, se busca ahora determinar la dosis de fibras que entregue un valor de $R_{e,3}$ equivalente al efecto mecánico aportado por dicha cuantía. A fin de evitar definir arbitrariamente un valor objetivo de $R_{e,3}$, se plantea un enfoque basado en la equivalencia funcional de capacidades resistentes. Se compara el momento flector nominal proporcionado por la malla de acero con el que debería entregar el HRF, según el modelo simplificado descrito en la sección 5.3. Este enfoque permite derivar un valor de $R_{e,3}$, objetivo que garantice un comportamiento postfisura comparable.

El momento resistente del sistema con refuerzo convencional se calcula mediante la ecuación (12), ya presentada en la sección 5.4:

$$M_{n-RC} = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

donde:

- $A_s = 138,5 \text{ mm}^2/\text{m}$ es el área de acero por metro (malla C139),
- $f_y = 490 \text{ MPa}$ es la resistencia de fluencia del acero trefilado AT56-50H,
- d es la altura efectiva del refuerzo respecto a la superficie ($\approx 40 \text{ mm}$),
- a es la profundidad del bloque comprimido (ecuación ((13))).

Este momento se compara con el que puede entregar el HRF, estimado mediante la ecuación (4):

$$M_{n-HRF} = f_{e,3} \cdot \frac{b h^2}{6} = R_{e,3} \cdot f_r \cdot \frac{b h^2}{6}$$

donde f_r es la resistencia a la primera fisura del hormigón. En este análisis se adopta un valor de $f_r = 3,1 \text{ MPa}$, estimado a partir de la resistencia a compresión de la mezcla base ($\approx f_{c'} = 25 \text{ MPa}$) mediante la expresión recomendada por el ACI 318: $f_r = 0,62 \cdot \sqrt{f_{c'}}$.

Igualando ambos momentos y resolviendo para $R_{e,3}$, se obtiene un valor objetivo de $R_{e,3} = 0,35$. Establecido este valor, se puede estimar la dosis de fibras necesaria utilizando la correlación empírica propuesta por Meza *et al.*, expresada en la ecuación (15). Entonces, despejando la dosis (Dos), se obtiene:

$$Dos = \frac{0,35 - 0,317}{0,0101} \approx 3,30 \text{ kg/m}^3$$

Esta dosificación corresponde a un volumen de fibras V_f de aproximadamente 0,24 %, lo cual se puede considerar un contenido entre bajo y moderado. Si bien este nivel de refuerzo es adecuado para limitar la fisuración por retracción y controlar deformaciones postfisura, no garantiza por sí solo la capacidad portante frente a cargas estructurales puntuales. Por lo tanto, si la losa debe resistir cargas concentradas, como las generadas por vehículos livianos, será necesario verificar su desempeño mediante un análisis adicional (por ejemplo, usando la teoría de la línea de fluencia).

Para este análisis, se adopta una geometría de fibra representativa dentro del rango evaluado por Meza *et al.*, en particular aquella correspondiente a una longitud de 53 mm. Las propiedades geométricas consideradas se presentan en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3: Características geométricas de las fibras R-PET seleccionadas.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud	53	mm
Ancho	2	mm
Espesor	$\approx 0,3$	mm
Relación de aspecto	50	-

Finalmente, debido al bajo contenido de fibras (inferior al 0,25 % en volumen) y a la relación agua/cemento moderada de la mezcla base, no se considera necesario el uso de aditivos plastificantes. Este enfoque favorece una dosificación simple y económicamente viable, sin comprometer la homogeneidad del hormigón.

CAPÍTULO 7

Análisis económico y de impacto ambiental

7.1 Incidencia económica y ambiental del sector de la construcción y necesidad de alternativas sostenibles

El sector de la construcción es uno de los pilares de la economía chilena, aportando un 6% del PIB nacional [56] y generando miles de empleos directos e indirectos. Sin embargo, enfrenta importantes desafíos en términos económicos y ambientales, que demandan explorar alternativas más sostenibles e innovadoras.

Desde un punto de vista económico, la fuerte dependencia de materiales como el acero y el cemento —los dos insumos más utilizados en la construcción tradicional— expone al sector a las fluctuaciones internacionales de precios y disponibilidad. Chile importa la mayor parte del acero que consume, lo que incrementa su vulnerabilidad. Además, la producción de cemento —aunque principalmente abastecida localmente— implica altos costos energéticos y genera significativas emisiones de CO₂, representando cerca del 8% de las emisiones globales de este gas en el sector industrial.

A nivel ambiental, la construcción se ha identificado como una de las actividades con mayor huella ecológica en el país. Según datos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo [57], el rubro contribuye de forma relevante a la generación de residuos sólidos y emisiones contaminantes, tanto en la etapa de producción de materiales como en la ejecución de obras (ver Figura 7.1).



Figura 7.1: Resumen impacto ambiental del sector de la construcción en Chile [57].

Ante este escenario, surge la necesidad de incorporar soluciones más sostenibles. Una de ellas es la reutilización de residuos plásticos, específicamente fibras PET recicladas, como refuerzo alternativo en elementos constructivos no estructurales. Esta innovación permite reducir la dependencia de acero convencional, disminuir la huella de carbono del material y dar salida a una fracción creciente de residuos plásticos, alineándose con los principios de la economía circular.

7.2 Reciclaje y valorización del PET en Chile

Para situarse en contexto nacional, el consumo anual de plásticos se estima en 1.357.000 toneladas, de las cuales solo un 7,5% es reciclado. De este total reciclado, un 17% corresponde a residuos domiciliarios y el 83% a residuos industriales o comerciales. Dentro del reciclaje domiciliario, el PET es el plástico más común, representando alrededor del 79% del volumen reciclado en ese segmento, lo que equivale a unas 7.889 toneladas anuales provenientes de hogares [58].

Este bajo nivel de valorización ha motivado una creciente preocupación pública y privada en torno a la sostenibilidad y la gestión de residuos. Como respuesta, se han implementado importantes iniciativas, como la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y la Ley de Plásticos de Un Solo Uso (PUSU), las cuales establecen obligaciones claras para los productores de envases en cuanto a la recolección y reciclaje de sus productos postconsumo.

Según cifras de ASIPLA, entre 2020 y 2022, el volumen total de materiales plásticos reciclados en el país aumentó en un 15%, y específicamente el reciclaje de PET creció en un 26%. Este avance también se ha visto reflejado en el aumento de la capacidad instalada para reciclaje, que alcanzó las 155.000 toneladas anuales en 2022, con aproximadamente un 20% de dicha capacidad destinada al procesamiento de PET, distribuidas en 52 empresas recicladoras [58].

A pesar de estos avances, las cifras globales siguen evidenciando una brecha considerable. Del total de PET consumido en Chile (que se estima en unas 232.000 toneladas anuales), solo cerca del 4% se recicla efectivamente. Esta cifra ubica al PET en el último lugar en la valorización nacional de materiales reciclables, muy por debajo del 82% de valorización que alcanzan, por ejemplo, los materiales ferrosos [65]. Además, considerando que para el año 2030 se proyecta que la producción de envases plásticos podría superar las 850.000 toneladas anuales, resulta aún más urgente aumentar las tasas de recolección y fortalecer la infraestructura destinada a su valorización [66].

La incorporación de PET reciclado en materiales de construcción, como el hormigón reforzado con fibras, representa una alternativa complementaria a las estrategias actuales de gestión de residuos. Su uso permite diversificar las aplicaciones de este residuo, fomentar su reincorporación en la cadena productiva y contribuir a la economía circular, reduciendo al mismo tiempo la presión sobre los sistemas de recolección y reciclaje tradicionales.

7.3 Costos de fabricación

La viabilidad económica del uso de fibras PET recicladas como refuerzo en losas apoyadas sobre terreno se evaluó mediante un análisis comparativo frente a la solución tradicional con malla de acero. El estudio abarcó los costos asociados tanto al hormigón, el refuerzo y la mano de obra necesarias para la fabricación y colocación de las losas. Dado que se trata de una construcción a pequeña escala, no se requiere una infraestructura compleja ni espacios de almacenamiento adicionales. Las labores de mano de obra consideradas incluyen el vaciado del hormigón, su nivelación, vibrado y terminación superficial, seguidas del proceso de curado.

Debido al volumen de hormigón necesario (75 m^3), se contempla mezclar en una planta de hormigón para optimizar el tiempo y la productividad. De todas formas, los costos asociados a la fabricación del hormigón se calculan según el diseño de mezcla indicado en la Tabla 6.2, más un proporcional por concepto de mezclado. Los precios de los insumos utilizados corresponden a valores referenciales de mercado, los cuales están detallados en el Anexo B.

A diferencia de otros materiales, el precio del PET reciclado presenta una mayor ambigüedad, ya que no existe un mercado formal establecido para su comercialización como fibra de refuerzo. Al tratarse de un residuo postconsumo, su costo como materia prima puede considerarse muy bajo o incluso nulo. No obstante, su utilización en hormigón requiere procesos básicos de recolección, clasificación, limpieza y corte, los cuales implican ciertos costos operativos.

Para tener una idea, se requieren aproximadamente 30 botellas plásticas de 600 ml para obtener un kilogramo de PET, algunas fuentes indican que el valor de compra directa de PET reciclado a empresas recicladoras de botellas ronda los 200 pesos chilenos por kilogramo [59]. Además, debe considerarse que no toda la botella es utilizable para la fabricación de fibras, ya que solo el cuerpo es apto para este propósito. En base a una estimación que contempla tanto el consumo de energía eléctrica como los costos de mano de obra asociados al proceso, se ha adoptado un valor de referencia de \$800 pesos chilenos por kilogramo de fibra PET reciclada, suponiendo además un rendimiento del 70 % en la transformación de botellas plásticas postconsumo en fibras útiles para refuerzo (Anexo B).

Para el presente análisis se adoptó un valor de referencia acorde a una producción artesanal a baja escala, evitando procesos industriales costosos como la extrusión. Se consideró, por ejemplo, el uso de una trituradora eléctrica para generar tiras delgadas de aproximadamente 3 mm de ancho, que luego se cortan a la longitud requerida mediante una guillotina manual o semiautomática. Este método, de relativo bajo costo y accesible, permite acondicionar el material para su uso como refuerzo, manteniendo así la viabilidad económica del sistema propuesto.

En el caso de la construcción de losa con malla, es necesario considerar algunos trabajos adicionales durante su instalación, como el corte, doblado y posicionamiento de los armazones en el tercio superior del espesor, lo que requiere el uso de silletas o separadores. Además, se debe realizar el empalme y amarre adecuado de las mallas en los puntos de traslape. En contraste, el uso de fibras PET

resulta más sencillo desde el punto de vista operativo, ya que estas se incorporan directamente a la mezcla durante la preparación del hormigón como un agregado más y solo requieren entre 3 y 5 minutos adicionales de mezclado para lograr una dispersión homogénea y evitar aglomeraciones [14].

Esta diferencia se refleja en la demanda de mano de obra: algunas fuentes reportan que la preparación de la malla, su instalación y el acabado del hormigón en losas tradicionales exige un promedio de 0,2 HH (horas-hombre) por metro cuadrado de construcción [12], mientras que en el caso del refuerzo con fibras PET, esta se reduce a aproximadamente 0,11 HH/m², lo que representa una disminución cercana al 45% en tiempo de trabajo.

A continuación, se presenta la estimación del costo total de construcción de la losa para ambos escenarios analizados. A partir del diseño de mezcla y la cuantía de refuerzo definida para cada alternativa, se calculan las cantidades de materiales requeridos y sus respectivos costos de fabricación. La Tabla 7.1 resume estos valores, e incluye además una estimación del costo de la mano de obra y del costo total por metro cuadrado de superficie construida.

Tabla 7.1: Costos de fabricación total y por metro cuadrado de losa según tipo de refuerzo.

Ítem		Losa con malla de acero	Losa con fibras PET de refuerzo
		Costo (CLP)	Costo (CLP)
Hormigón	Cemento	\$4.366.200	\$4.366.200
	Agregado fino	\$456.750	\$456.750
	Agregado grueso	\$1.368.750	\$1.368.750
Mezclado hormigón		\$ 225.000	\$ 225.000
Fibras PET		-	\$ 219.285
Malla refuerzo		\$2.075.850	-
Mano de Obra		\$687.500	\$343.750
Total		\$9.180.050	\$6.979.735
Total por m²		\$14.689	\$11.168

De acuerdo a lo estimado en la Tabla 7.1, la utilización del plástico reciclado como refuerzo en sustitución de mallas de acero en una losa de 120 mm de espesor, implica una reducción importante en el costo final del elemento fabricado (Figura 7.2), reducción que alcanza los \$2.220.315 CLP, lo que equivale a un 23,96% de ahorro respecto a la alternativa con malla. En términos de superficie, este ahorro representa \$3.521 CLP por metro cuadrado de losa.

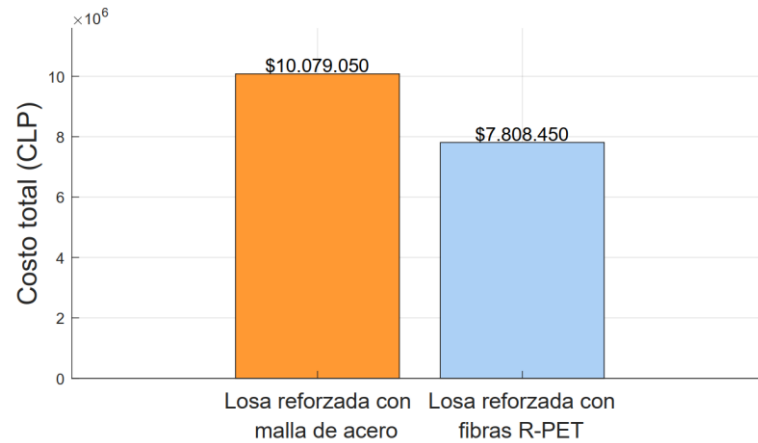


Figura 7.2: Costo estimado de losas con refuerzo tradicional y alternativo (R-PET).

El mayor ahorro proviene evidentemente, de la eliminación del elevado costo de la malla de acero, que, en términos de refuerzo, es aproximadamente unas 9,5 veces mayor que el de las fibras PET recicladas y representan el 20% del costo total dentro de la construcción de la losa. En cambio, las fibras PET corresponderían solo al 3,1% del costo total, como se muestra en la Figura 7.3.

Para una superficie de uso liviano, se estima un requerimiento de 2,18 kg de acero por m² de superficie construida, frente a solo 396 gramos/m² de PET reciclado para alcanzar un nivel de refuerzo comparable. Lo cual, si se piensa en mayor escala, también implica reducciones por concepto de gastos asociados a transporte o almacenamiento.

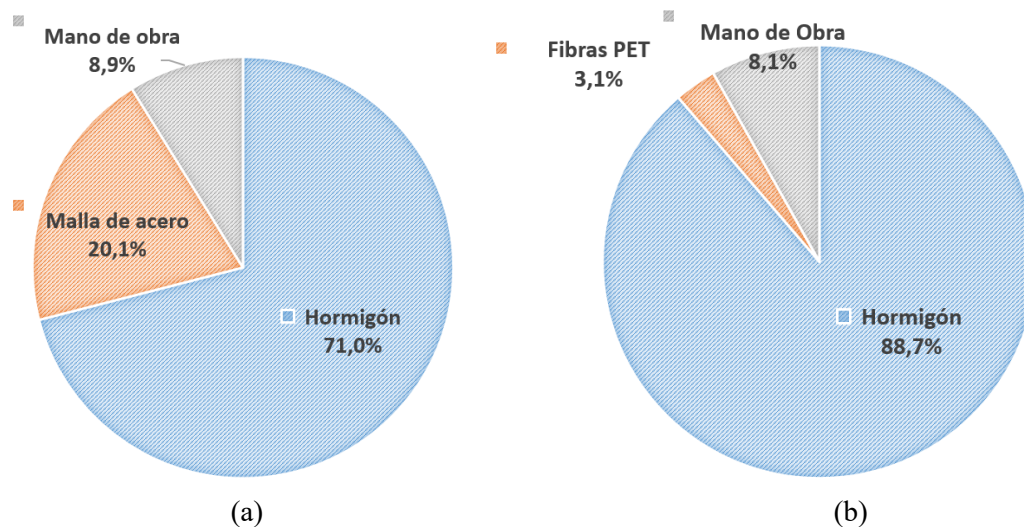


Figura 7.3: Distribución porcentual de los costos por ítem en losas reforzadas: (a) Malla acero, (b) Fibras PET.

El uso de fibras R-PET como refuerzo alternativo no solo demuestra una alta eficiencia económica, sino que también simplifica el proceso constructivo al integrarse directamente al hormigón, sin requerir manipulaciones adicionales. Esto se traduce en menores tiempos de instalación y una reducción en la demanda de mano de obra. Además, el acero, debido a su naturaleza altamente corrosiva, puede sufrir un deterioro prematuro, lo que eventualmente ocasiona costos adicionales en reparaciones y mantenimiento.

Sin embargo, para que esta solución sea realmente viable a mayor escala, es necesario optimizar el proceso de fabricación y tratamiento de las fibras PET, de modo que se garantice una calidad uniforme y un suministro competitivo. Esto requiere fortalecer la cadena de suministro local y enfrentar la competencia con otros usos más rentables del PET reciclado, como pueden ser la industria textil o de envases.

7.4 Análisis de ciclo de vida

Se emplea la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una herramienta de gestión ambiental que permite evaluar los impactos asociados a un producto, proceso o actividad a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas, pasando por la fabricación y transporte, hasta su uso, reciclaje o disposición final. El objetivo del ACV es identificar y cuantificar los flujos de materiales y energía, así como evaluar sus efectos ambientales a lo largo del ciclo de vida completo. Esto proporciona una visión integral y objetiva de la sostenibilidad de la actividad. Esta metodología sigue los lineamientos establecidos en la norma ISO 14040, la cual establece los principios y el marco general para llevar a cabo una evaluación del ciclo de vida.

Para el presente análisis, se adopta un enfoque de ACV tipo cradle-to-gate, considerando únicamente las fases de extracción de materias primas, manufactura, transporte y construcción de la losa. Se excluyen las etapas de uso, mantenimiento y disposición final, con el fin de centrar la comparación ambiental en el impacto directo de la elección del material de refuerzo (acero vs. PET reciclado). El objetivo es cuantificar las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) y el consumo energético total, expresado en kWh asociados a las etapas previamente mencionadas.

En el transporte de los materiales, se ha considerado una distancia promedio de 15 km, una estimación razonable para construcciones emplazadas en zonas urbanas, donde las plantas de hormigón premezclado, centros de acopio de áridos y proveedores de materiales suelen ubicarse dentro de ese radio geográfico. Para el proceso ejecución de obras y fabricación de fibras PET, se considera un estimado del consumo energético (energía eléctrica y combustibles fósiles) asociado a las acciones básicas requeridas indicadas en la sección anterior.

Las emisiones de CO_{2e} asociadas a cada material de insumo fueron estimadas en función de su cantidad y del respectivo factor de emisión. Los factores utilizados, junto con sus fuentes y referencias, se detallan en el Anexo C. En la Tabla 7.2 se presenta la estimación de la demanda energética y la

huella de carbono asociadas al proceso de extracción y procesamiento de los materiales, mientras que en la Tabla 7.3 se muestran los resultados totales obtenidos para cada caso de estudio.

Tabla 7.2: Huella de carbono y demanda energética por material (etapas de extracción y procesamiento).

Material	kWh	kg CO _{2e}
Cemento	69.712,7	23.841,75
Agregado grueso	855,5	231,0
Agregado fino	522,7	141,12
Malla acero	14.115,5	3.303,0
Fibras PET	35,36	10,61

Tabla 7.3: Huella de carbono y demanda energética totales para fabricación losas.

Etapa ciclo vida	Losas con malla de acero		Losas con fibras PET de refuerzo	
	kWh	kg CO _{2e}	kWh	kg CO _{2e}
Extracción y procesamiento	85.206	27.517	71.126	24.224
Transporte insumos	1.386	370	1.371	367
Construcción	2.409	674	2.190	613
Total	88.999	28.561	74.687	25.204
Total por m²	0,1424	0,0457	0,1195	0,0403

A partir de los resultados expuestos, se infiere que la losa construida con refuerzo de fibras R-PET constituye una alternativa más sustentable en comparación con una estructura reforzada con acero, al presentar una huella de carbono total de 25.204 kg de CO_{2e}, cifra que representa una disminución del 11,75% en las emisiones totales de CO_{2e} respecto de la losa reforzada con malla de acero (véase Figura 7.4).

Aislado el impacto ambiental asociado exclusivamente al refuerzo del elemento, este se reduce en un 99,7%, dado que el uso de PET reciclado postconsumo implica un impacto prácticamente nulo. Esto se debe a que, bajo un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida, no se considera la energía incorporada en su producción original. En contraste, para producir los 1771 kg de acero que se necesitan, se emiten unos 3300 kg de CO_{2e}.

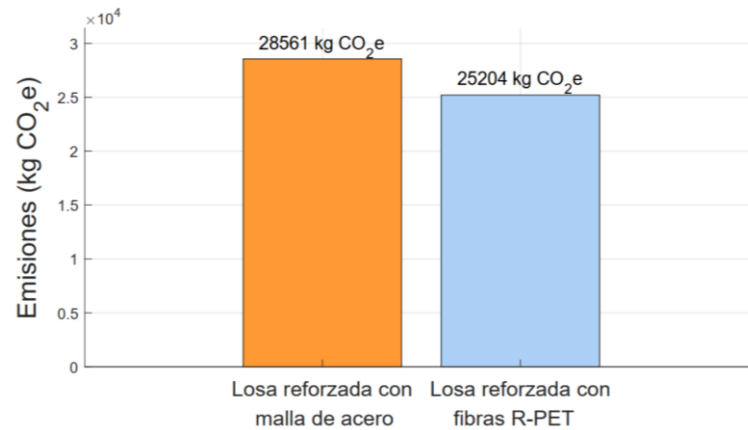


Figura 7.4: Comparación de emisiones de CO₂e entre losa reforzada con malla de acero y fibras R-PET.

Si bien la incorporación de fibras PET recicladas constituye una alternativa más amigable con el medio ambiente, el elemento construido continúa presentando un impacto ambiental importante, solo por el hecho de estar fabricado con cemento, material que concentra el 98,4 % de las emisiones generadas en la etapa de extracción y procesamiento de los materiales que componen el hormigón (Figura 7.5), revelando el alto consumo energético asociado a su producción y haciendo de esta etapa la más contaminante del ciclo de vida de la losa. Por lo tanto, aunque la eliminación del acero como refuerzo contribuye significativamente a la reducción de emisiones, es necesario complementar dicha medida con estrategias adicionales, tales como la optimización del diseño de mezcla, el uso de cementos con menor huella de carbono o la incorporación de materiales suplementarios más sostenibles.

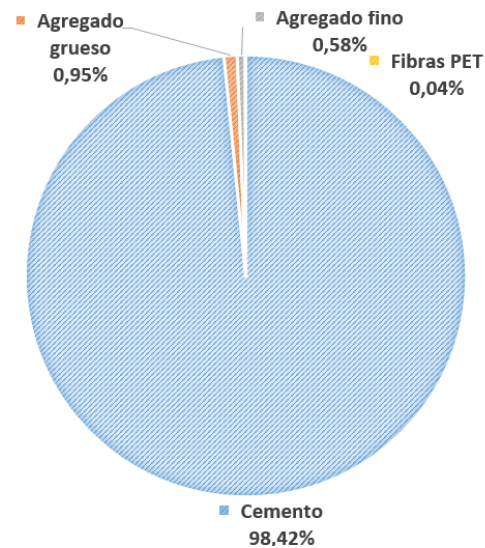


Figura 7.5: Distribución porcentual de la huella de carbono en etapa de extracción y procesamiento según material para losa reforzada con fibras R-PET.

CAPÍTULO 8

Conclusiones

Se evaluó la factibilidad técnica, económica y ambiental del uso de fibras PET recicladas en el hormigón y su aplicación en losas apoyadas sobre terreno como reemplazo de mallas de acero.

La revisión bibliográfica realizada indicó que la incorporación de fibras R-PET influye positivamente en algunas propiedades del hormigón, especialmente en el control de la fisuración por retracción plástica y por secado, mostrando resultados favorables incluso con fracciones volumétricas bajas de fibras (mayores a 0,1%). En cuanto a la resistencia mecánica, la literatura muestra que la resistencia a compresión no mejora de forma consistente, y que puede incluso disminuir con dosificaciones altas o mezclas muy densas. Aunque la flexión mejora en varios casos, los efectos son más notables en la etapa post-fisura, y no necesariamente en el valor pico de carga estructural.

Del análisis de los datos reportados en los estudios revisados, se estimó una aproximación a las dosis óptimas de incorporación de fibras, determinándose que, en promedio, una fracción volumétrica del 0,5 % proporciona mayores beneficios en condiciones de compresión, mientras que en flexión, una dosis del 1,5 % resulta más efectiva. Esto sugiere que dosis levemente superiores benefician de manera más significativa el comportamiento del hormigón frente a esfuerzos de flexión. Asimismo, se observó que fibras con longitudes entre 30 y 50 mm presentan, en promedio, las mejores prestaciones, en términos de distribución, anclaje y capacidad de transferencia de tensiones dentro de la matriz cementicia.

Con base en la evidencia revisada, las fibras PET recicladas se perfilan como una opción viable de refuerzo secundario o complementario, especialmente orientada al control de fisuración en elementos constructivos no sometidos a cargas estructurales elevadas.

En el caso estudiado, correspondiente a una losa de uso ligero tipo residencial, se determinó que una fracción volumétrica de 0,24 % de fibras PET recicladas constituye una dosificación mínima recomendada, adecuada para el control de fisuración en elementos de baja exigencia estructural. Esta alternativa ofrece un desempeño funcional comparable al de una malla de acero convencional utilizada para estos fines, y presenta ventajas prácticas como el menor peso, la facilidad de manipulación y la ausencia de riesgo de corrosión, asociado a una mejora en la durabilidad superficial. De forma complementaria, se ha reportado una mejor resistencia frente a fuerzas de impacto.

Desde el punto de vista económico, se determinó que el uso de fibras PET recicladas podría ser competitivo frente a las soluciones tradicionales con mallas de acero, siempre que se cuente con una disponibilidad local adecuada del material reciclado, y se optimicen aspectos como los costos de adquisición, transporte, procesamiento y escala de producción. En particular, el análisis económico evidenció una disminución del 23,96 % en el costo por metro cuadrado de superficie construida en el

caso de una losa de 120 mm de espesor, lo que demuestra el potencial de esta alternativa en escenarios óptimos.

El análisis medioambiental mediante ACV reveló una reducción del 11,75 % en la huella de carbono hasta la etapa de construcción. Esta alternativa no solo disminuye el impacto ambiental del hormigón reforzado, sino que además contribuye a la valorización de residuos plásticos postconsumo, ayudando a reducir efectivamente la cantidad de desechos que llegan a vertederos y apoyando los principios de la economía circular y la gestión sostenible de residuos.

Para favorecer una implementación masiva y sostenible, sería necesario impulsar alianzas público-privadas, establecer incentivos para el desarrollo de infraestructura de reciclaje local, y promover normativas técnicas que habiliten el uso de materiales reciclados, particularmente aquellas aplicables al diseño y uso de hormigón reforzado con fibras. Esto no solo promueve la sostenibilidad ambiental, sino también genera impactos sociales positivos, mediante la creación de eventuales empleos y el fortalecimiento de cadenas productivas locales basadas en el aprovechamiento de recursos disponibles.

Se recomienda realizar estudios experimentales adicionales que permitan evaluar el comportamiento a largo plazo del hormigón reforzado con fibras PET recicladas, especialmente bajo condiciones ambientales adversas. Por otro lado, resultaría valioso llevar a cabo pruebas a escala real en pisos apoyados sobre terreno, lo que permitiría evaluar su potencial en aplicaciones sometidas a mayores solicitaciones, como los pisos industriales. También se sugiere profundizar en el análisis de geometrías de fibras, como las fibras circulares presentadas en la revisión bibliográfica, y realizar ensayos que permitan evaluar su comportamiento post-fisura, con el objetivo de extraer parámetros que orienten la dosificación óptima del refuerzo según el tipo de aplicación. Finalmente, se plantea la exploración de técnicas que mejoren la dispersión y distribución uniforme de las fibras en la mezcla, con el fin de potenciar su desempeño y ampliar su aplicabilidad estructural.

Referencias

- [1] Global Cement and Concrete Association (GCCA), «Plan de trabajo hacia una industria del cemento y hormigón neutra en carbono para 2050 de la Asociación Mundial de Productores de Cemento y Hormigón», 2021. Disponible en: <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/11/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Spanish.pdf>
- [2] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH), «Hoja de Ruta Chile, Cemento y Concreto – Net Zero 2050», 2023. Disponible en: <https://ich.cl/hola-de-ruta-chile-cemento-y-concreto-net-zero-2050/>
- [3] Bunster, V., y W. Bustamante. «Inventario de materiales de construcción en Chile: Metodología y resultados», Síntesis de Investigación N°08, Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Santiago, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.7764/cedeus.si.08>
- [4] D. Foti, F. Paparella, «Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids», *Mechanics Research Communications*, Volume 57, 2014, Pages 57-66, ISSN 0093-6413, <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.02.007>
- [5] Heinrich Böll Foundation, «Plastic Atlas: Facts and Figures about the World of Synthetic Polymers», 2nd ed., Berlin, 2019. Disponible en: <https://eu.boell.org/sites/default/files/2021-01/Plastic%20Atlas%202019%202nd%20Edition.pdf>
- [6] Vollmer, M.J.F. Jenks, M.C.P. Roelands, R.J. White, T. van Harmelen, P. de Wild, *et al.* «Beyond mechanical recycling: giving new life to plastic waste» *Angew. Chem. Int. Ed.*, 59, 2020, pp. 15402-15423, <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>
- [7] R. Geyer, J.R. Jambeck, K.L. Law, «Production, use, and fate of all plastics ever made», *Sci. Adv.* 3 (7), 2017, e1700782, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [8] ASIPLA (Asociación Gremial de Industriales del Plástico), «Resumen ejecutivo 3° estudio sobre reciclaje de plásticos en Chile 2022», 2024. Disponible en: <https://asipla.cl/wp-content/uploads/2024/07/estudio-de-reciclaje-de-los-plasticos-2022-version-enero-2024-ejecutiva.pdf>
- [9] M. Kangavar, W. Lokuge, A. Manalo, W. Karunasena, M. Frigione, «Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement», *Case Studies in Construction Materials*, Volume 16, 2022, Article e00934, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00934>
- [10] Kim, S. B., N. H. Yi, H. Y. Kim, J. J. Kim, and Y. C. Song. «Material and Structural Performance Evaluation of Recycled PET Fiber Reinforced Concrete», *Cement & Concrete Composites*, Volume 32, Issue 3, 2010, Pages 232-240.
- [11] S. Yin, R. Tuladhar, F. Shi, M. Combe, T. Collister, N. Sivakugan, «Use of macro plastic fibres in concrete: A review», *Construction and Building Materials*, Volume 93, 2015, Pages 180–188, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105>
- [12] T. Ochi, S. Okubo, K. Fukui, «Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber», *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 6, 2007, Pages 448–455, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>
- [13] S. De Silva, R. Rathnayak, «Use of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Fibers in Concrete Cylindrical Pipes», *Engineer: Journal of the Institution of Engineers*, Sri Lanka, 51(2), 2018, Pages 15–21, <https://doi.org/10.4038/engineer.v51i2.7291>

- [14] GCP Applied Technologies, «Fiber-Reinforced Concrete Handbook», 2018. Disponible en: <https://www.gcpat.com/sites/default/files/2021-01/Fiber-Reinforced-Concrete-Handbook.pdf>
- [15] American Concrete Institute (ACI), «ACI CT-13: ACI Concrete Terminology», *Farmington Hills*, 2013.
- [16] Asociación Nacional de Fabricantes de Mortero (AFAM), «Morteros: Guía general», AFAM, 2003. Disponible en: https://www.arquitectosdecadiz.com/wp-content/uploads/2017/12/afam._morteros._guia_general._01.2006.pdf
- [17] Instituto Nacional de Normalización (INN), «NCh163:2024 - Áridos para morteros y hormigones – Requisitos», 2024.
- [18] Instituto Nacional de Normalización (INN), «Normas Aprobadas agosto 2024», 2024. Disponible en: <https://www.inn.cl/normas-aprobadas-agosto-2024>
- [19] Instituto Nacional de Normalización (INN), «NCh1498:2012 - Hormigón y mortero - Agua de amasado - Clasificación y requisitos», 2012.
- [20] ASTM International, «ASTM C1116/C1116M-23: Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete», 2023.
- [21] American Concrete Institute (ACI), «ACI 544.4R-18: Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete», Reported by ACI Committee 544, 2018.
- [22] Instituto Nacional de Normalización (INN), «NCh1019.Of2009 - Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams», 2009.
- [23] Instituto Nacional de Normalización (INN), «Norma Chilena NCh1037.Of2009 – Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas », 2009.
- [24] Instituto Nacional de Normalización (INN), «NCh1170:2012 - Hormigón – Ensayo de tracción por hendimiento», 2012.
- [25] Instituto Nacional de Normalización (INN), «NCh1038.Of2009 - Hormigón – Ensayo de tracción por flexión», 2009.
- [26] Concrete Society, «Concrete Industrial Ground Floors: A Guide to Design and Construction», 4th ed., 2013.
- [27] J. Kim, C. Park, S. Lee, S. Lee, J. Won, «Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites», *Composites Part B: Engineering*, Volume 39, Issue 3, 2008, Pages 442-450, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.05.001>
- [28] American Concrete Institute (ACI), «Control of Cracking in Concrete Structures – ACI 224R-01», 2001.
- [29] D. Foti, «Use of recycled waste PET bottles fibers for the reinforcement of concrete», *Composite Structures*, Volume 96, 2013, Pages 396–404, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.019>
- [30] F. Fraternali, V. Ciancia, R. Chechile, G. Rizzano, L. Feo, L. Incarnato, «Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete», *Composite Structures*, Volume 93, Issue 9, 2011, Pages 2368–2374, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.025>
- [31] R. Borg, O. Baldacchino, L. Ferrara, «Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete», *Construction and Building Materials*, Volume 108, 2016, Pages 29–47, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029>

- [32] Y. Mouna, B. Irfan, M. Rahman, M. Batikha, «A statistical-experimental study to investigate the optimal parameters of fibres made from waste PET bottles for strengthening concrete», *Construction and Building Materials*, Volume 420, 2024, Article 135613, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135613>
- [33] L. Rasheed, A. Shaban, A. Abdulrasool, «Mechanical and Structural Characteristics of PET Fiber Reinforced Concrete Plates», *Smart Science*, 10(3), 2021, 198–212, <https://doi.org/10.1080/23080477.2021.1997136>
- [34] A. Meza, P. Pujadas, L. Meza, F. Pardo-Bosch, R. López-Carreño, «Mechanical Optimization of Concrete with Recycled PET Fibres Based on a Statistical-Experimental Study», *Materials*, 14(2), 2021, Article 240, <https://doi.org/10.3390/ma14020240>
- [35] R. Nibudey, P. Nagarnaik, D. Parbat, A. Pande, «Strength and fracture properties of post consumed waste plastic fiber reinforced concrete», *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development*, 3, 2013, 9-16.
- [36] F. Pelisser, O. Montedo, P. Gleize, H. Roman, «Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete», *Materials Research*, 15(4), 2012, Pages 679–686, <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000088>
- [37] A. Mohammed, S. Karim, «Impact strength and mechanical properties of high strength concrete containing PET waste fiber», *Journal of Building Engineering*, Volume 68, 2023, Article 106195, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106195>
- [38] J. Won, D. Lim, C. Park, «Bond behaviour and flexural performance of structural synthetic fibre-reinforced concrete», *Magazine of Concrete Research*, 58(6), 2006, Pages 401–410.
- [39] C. Marthong, D. Kumar, «Influence of PET fiber geometry on the mechanical properties of concrete: an experimental investigation», *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Volume 20, Issue 7, 2016, Pages 771–784, <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1072112>
- [40] S. Revathi, P. Sathis Kumar, D. Suresh, S. Thowfick Anwar, «Behaviour of concrete with PET bottles as fibers & silica fume as partial replacement of cement», *Materials Today: Proceedings*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.580>
- [41] S. Suraweera, S. De Silva, «Effect of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) fibres on fresh and hardened properties of concrete: a review», *International Journal of Sustainable Engineering*, 16(1), 2023, Pages 269–284, <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2257735>
- [42] C. Özgün, Ö. Eren, «Physical and durability properties of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced concrete», *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(14), 2022, 7084–7102, <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1976681>
- [43] F. Fraternali, V. Ciancia, R. Chechile, L. Rizzano, G. Feo, L. Incarnato, «Effects of recycled PET fibres on the mechanical properties and seawater curing of Portland cement-based concretes», *Construction and Building Materials*, Volume 61, 2014, 293–302, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.019>
- [44] J. Carrillo, D. Silva, M. Sánchez, «Performance of Concrete Slabs-on-Ground Reinforced with Welded-Wire Mesh or Steel Fibers», *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Volume 17, 2016, 499–510, <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.009>

- [45] D. Foti, «Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers», *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 4, 2011, Pages 1906–1915, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>
- [46] F. Shi, T. M. Pham, R. Tuladhar, Z. Deng, S. Yin, H. Hao, «Comparative performance analysis of ground slabs and beams reinforced with macro polypropylene fibre, steel fibre, and steel mesh», *Structures*, Volume 56, 2023, Article 104920, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104920>
- [47] A. Huarachi, «Estudio del agrietamiento de losas de concreto $f'c$ 210 kg/cm² en zonas frías adicionando fibras recicladas (PET) en la región de Puno», Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, 2024.
- [48] A. Alani, D. Beckett, «Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab», *Construction and Building Materials*, Volume 41, 2013, Pages 335–344, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.043>.
- [49] S. De Silva, T. Prasanthan, «Application of Recycled PET Fibers for Concrete Floors», *Engineer: Journal of the Institution of Engineers*, Sri Lanka, 52(1), 2019, Pages 21–27, <https://doi.org/10.4038/engineer.v52i1.7340>
- [50] ASTM International, «ASTM C1609/C1609M-12: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)», 2012.
- [51] R. Awad, S. Barakat, M. Leblouba, S. Altoubat, M. Maalej, «Reliability-based design of fiber reinforced concrete slabs-on-ground in flexure as per ACI 360», *Structures*, Volume 39, 2022, Pages 207–217, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.004>
- [52] American Concrete Institute (ACI), «ACI 360R-10: Guide to Design of Slabs-on-Ground», Reported by ACI Committee 360, 2010.
- [53] Concrete Society, «Concrete Industrial Ground Floors – A Guide to Design and Construction (TR34)», 4th ed., The Concrete Society, UK, 2013.
- [54] Portland Cement Association (PCA), «Concrete Floors on Ground», 2001.
- [55] Instituto Nacional de Normalización (INN), «NCh430.Of2008 - Hormigón armado – Requisitos de diseño y cálculo», 2008.
- [56] Cámara Chilena de la Construcción (CChC), «Proyecciones económicas 2025: Análisis y perspectivas del sector construcción», 2024. Disponible en: <https://www.ccs.cl/wp-content/uploads/2024/11/Proyecciones2025-CChC-compressed.pdf>
- [57] Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). «Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile – Tomo V: Impacto Ambiental», 2018.
- [58] ASIPLA (Asociación Gremial de Industriales del Plástico), «Resumen ejecutivo 3° estudio sobre reciclaje de plásticos en Chile 2022», 2024. Disponible en: <https://asipla.cl/wp-content/uploads/2024/07/estudio-de-reciclaje-de-los-plasticos-2022-version-enero-2024-ejecutiva.pdf>
- [59] J. Infante, C. Valderrama, «Análisis Técnico, Económico y Medioambiental de la Fabricación de Bloques de Hormigón con Polietileno Tereftalato Reciclado (PET)», *Información Tecnológica*, 30(5), 2019, 25-36. <https://dx.doi.org/10.4067/S071807642019000500025>
- [60] B. Chavda, J. Zala, «Influence of PET Fiber Geometry on Properties of Concrete Using Partial Replacement of Fine Aggregate with Copper Slag», *Industrial Journal of Advanced Research In Science* 7, 2021, 2581–9429, <https://doi.org/10.48175/IJARST-1638>

- [61] S. Karthikeyan, B. Ramgughan, «Experimental Investigation of Effect of Waste PET Fibres on the Impact Behaviour of PET Fibre Reinforced Concrete», *Global NEST Journal*, Volume 26, Issue 3, 2024, Pages 1–5, <https://doi.org/10.30955/gnj.005202>
- [62] L. Sorelli, A. Meda, G. Plizzari, B. Rossi, «Experimental investigation on slabs on grade: Steel fibers vs conventional reinforcement», *6th International RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes*, pp. 1083-1092, 2004.
- [63] Ministerio del Medio Ambiente, «Factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono – Programa HuellaChile», 2024. Disponible en: https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/11/HuellaChile-DCC-Factores-de-emision-nivel-basico_v3.pdf
- [64] S. Kim, J. Kim, «Structural Performance Evaluation of Recycled PET Fiber Reinforced RC Slab», *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 17(1), 114–123, 2013. <https://doi.org/10.11112/JKSMI.2013.17.1.114>
- [65] Ministerio del Medio Ambiente, «Reporte del Estado del Medio Ambiente 2023», Ministerio del Medio Ambiente, 2023. Disponible en: <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/reporte-del-estado-del-medio-ambiente-2023/>
- [66] Fundación Chile, Ministerio del Medio Ambiente, «Hoja de Ruta del Pacto Chileno de los Plásticos», Fundación Chile, 2020. Disponible en: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2020/01/roadmap-pacto-chileno-de-los-plasticos.pdf>

Anexo A: Resumen resultados de la resistencia mecánica del hormigón reforzado con fibras PET reciclado de estudios revisados

Tabla A.1: Resultados de la resistencia de compresión y flexión de especímenes de hormigón reforzado con fibras PET reciclado, después de 28 días de curado según diferentes investigaciones.

Autor Investigación	Fracción volumen fibra PET [%]	Forma de fibra	Longitud [mm]	Resistencia diseño mezcla [Mpa]	Relación Agua/Cemento	Resistencia compresión [%]	Resistencia flexión [%]
Kim <i>et al.</i> [10]	0,5	Con relieve	50	25	0,45	- 1,0	-
	0,75	Con relieve	50	25	0,45	- 5,0	-
	1,0	Con relieve	50	25	0,45	- 9,0	-
Borg <i>et al.</i> [31]	0,5	Recta	50	30	0,55	- 7,1	- 1,7
	1,0	Recta	50	30	0,55	- 7,1	+ 17,9
	1,5	Recta	50	30	0,55	- 8,7	+ 17,9
	1,0	Recta	30	30	0,55	- 5,3	+ 10,3
	0,5	Deformada	50	30	0,55	- 0,5	+ 3,9
	1,0	Deformada	50	30	0,55	- 2,3	+ 21,0
	1,5	Deformada	50	30	0,55	- 8,0	+ 12,9
	1,0	Deformada	30	30	0,55	- 1,7	+ 15,4
Marthong y Sarma [39]	0,5	Recta	50	25	0,5	+ 3,5	+ 5,7
	0,5	Extremos aplanados	50	25	0,5	+ 19,3	+ 31,6
	0,5	Hoja de sierra	64	25	0,5	+ 24,1	+ 33,8
	0,5	Extremos curvos	60	25	0,5	+ 23,4	+ 31,6
Karthikeyan <i>et al.</i> [61]	0,25	Recta	50	30	0,45	+ 1,8	+ 32,1
	0,5	Recta	50	30	0,45	+ 3,7	+ 47,1

Autor Investigación	Fracción volumen fibra PET [%]	Forma de fibra	Longitud [mm]	Resistencia diseño mezcla [Mpa]	Relación Agua/Cemento	Resistencia compresión [%]	Resistencia flexión [%]
Mohammed <i>et al.</i> [37]	0,5	Recta	10	80	0,23	- 2,35	+3,89
	0,75	Recta	10	80	0,23	- 8,0	+13,0
	1,0	Recta	10	80	0,23	- 12,0	+9,71
	1,25	Recta	10	80	0,23	- 15,7	+7,82
	1,5	Recta	10	80	0,23	- 15,0	+5,56
	0,5	Recta	20	80	0,23	- 5,2	+10,0
	0,75	Recta	20	80	0,23	- 12,0	+15,2
	1,0	Recta	20	80	0,23	- 12,5	+18,0
	1,25	Recta	20	80	0,23	- 15,0	+24,0
	1,5	Recta	20	80	0,23	- 15,5	+18,0
	0,5	Recta	40	80	0,23	- 6,8	+13,0
	0,75	Recta	40	80	0,23	- 10,3	+19,5
	1,0	Recta	40	80	0,23	+ 7,8	+20,0
	1,25	Recta	40	80	0,23	- 12,5	+24,0
	1,5	Recta	40	80	0,23	- 13,0	+24,7
Revathi <i>et al.</i> [40]	0,75	Circular	$\Phi = 80$	25	0,45	+ 1,2	(*) +99,0
Chavda y Zala [60]	0,5	Recta	50	25	0,5	+ 3,72	+ 3,55
	0,5	Extremos aplanados	40	25	0,5	+ 5,48	+ 8,75
	0,5	Circular	$\Phi = 80$	25	0,5	+ 11,8	+ 13,95
Meza <i>et al.</i> [34]	0,15	Recta	53,5	25	0,6	- 2,5	- 8,0

(*) especímenes con adición de 10% de humo de sílice en reemplazo de cemento

Autor Investigación	Fracción volumen fibra PET [%]	Forma de fibra	Longitud [mm]	Resistencia diseño mezcla [Mpa]	Relación Agua/Cemento	Resistencia compresión [%]	Resistencia flexión [%]
	0,75	Recta	53,5	25	0,6	- 5,5	- 1,1
	0,45	Recta	85,6	25	0,6	- 4,6	- 5,3
	0,15	Recta	117,8	25	0,6	- 6,9	- 4,6
	0,75	Recta	117,8	25	0,6	- 8,8	+ 2,5
Mouna <i>et al.</i> [32]	1,0	Recta	25	50	0,33	0	- 1,0
	1,0	Recta	50	50	0,33	0	+ 4,0
	0,5	Recta	40	50	0,33	+ 4,0	+ 4,0
	1,0	Recta	40	50	0,33	+ 4,0	- 5,0
	1,5	Recta	40	50	0,33	- 9,0	- 3,0
De Silva <i>et al.</i> [49]	0,5	Recta	50	50	0,33	+ 14,0	+ 14,6
	1,0	Recta	50	50	0,33	+ 15,3	+ 22,4
	1,5	Recta	50	50	0,33	- 15,6	+ 31,8
Fraternali <i>et al.</i> [30]	1,0	Recta	52	25	0,53	+ 22,03	+2,06
	1,0	Encrespada	52	25	0,53	+ 0,03	+7,67
Ochi <i>et al.</i> [12]	0,5	Entallada	30	-	0,65	- 2,18	- 2,61
	1,0	Entallada	30	-	0,65	+ 8,41	+7,85
	1,5	Entallada	30	-	0,65	+ 6,23	+ 25,6
	0,5	Entallada	30	-	0,60	+ 11,5	- 3,64
	1,0	Entallada	30	-	0,60	+ 13,8	+ 2,18
	1,5	Entallada	30	-	0,60	+ 11,5	+ 28,4

Autor Investigación	Fracción volumen fibra PET [%]	Forma de fibra	Longitud [mm]	Resistencia diseño mezcla [Mpa]	Relación Agua/Cemento	Resistencia compresión [%]	Resistencia flexión [%]
	0,5	Entallada	30	-	0,55	+ 1,11	+ 4,75
	1,0	Entallada	30	-	0,55	+ 5,99	+ 15,2
	1,5	Entallada	30	-	0,55	-3,10	+ 36,1
Pelisser <i>et al.</i> [36]	0,05	Recta	20	-	0,62	- 3,01	+ 14,7
	0,18	Recta	20	-	0,62	- 7,49	+ 13,6
	0,3	Recta	20	-	0,62	+ 1,0	+ 19,2
Nibudey <i>et al.</i> [35]	0,5	Recta	25	-	0,48	+ 3,18	+ 10,2
	1,0	Recta	25	-	0,48	+ 4,30	+ 20,2
	1,5	Recta	25	-	0,48	+ 2,45	+ 15,2
	2,0	Recta	25	-	0,48	- 3,86	- 0,20
	2,5	Recta	25	-	0,48	- 12,1	- 2,81
	3,0	Recta	25	-	0,48	- 19,4	- 16,4
Rasheed <i>et al.</i> [33]	0,5	Recta	15	-	0,38	- 8,08	- 27,9
	1,0	Recta	15	-	0,38	- 10,5	- 27,1
	1,5	Recta	15	-	0,38	- 26,0	- 23,2
	2,0	Recta	15	-	0,38	- 26,1	- 7,19
Foti [45]	0,5	Recta	32	-	-	- 32,0	- 16,8
	0,5	Circular	$\Phi = 50 - 80$	-	-	- 37,6	- 18,0
	0,75	Circular	$\Phi = 50 - 80$	-	-	- 33,5	+ 2,2

Anexo B: Costos unitarios

Tabla B.1: Precios referenciales unitarios de insumos de fabricación hormigón (CLP).

Insumo	Costo unitario (CLP)	Comentario
Saco cemento (25 kg)	\$ 3.800	
Agregado fino (m ³)	\$ 14.500	Arena lavada
Agregado grueso (m ³)	\$ 25.000	Grava o Chancado
Agua (L)	\$ 1,4	Tarifa Essbio
Mano de obra mezclado (m ³)	\$3.000	
Mano de obra construcción losa (HH)	\$5.500	Válido tanto para labores de fabricación de losa como para instalación de mallas de acero

Tabla B.2: Precios referenciales unitarios de insumos asociados al refuerzo (CLP).

Insumo	Costo unitario (CLP)	Comentario
Fibras PET (kg)	\$ 800	
Malla C139 (unidad)	\$32.950	Medida: 5,0 x 2,6 m

El costo unitario de producción de fibra PET reciclada se determinó considerando un precio base de \$200 CLP por kilogramo de PET reciclado y un rendimiento del 70 %, lo que implica que se requieren aproximadamente 1,43 kg de PET para obtener 1 kg de fibra utilizable. En la Tabla B.3 se presenta un desglose de los principales componentes del costo unitario, incluyendo materia prima, energía eléctrica (considerando un valor de \$142 CLP/kWh) y mano de obra directa. El costo total estimado asciende a \$800 CLP por kilogramo de fibra PET.

Tabla B.3: Estimación del costo por kilogramo de fibra PET reciclada (CLP).

Ítem	Costo unitario (CLP)
PET reciclado	\$ 286
Mano de obra	\$ 413
Energía eléctrica	\$ 101
Total por kg	\$ 800

Anexo C: Parámetros de Evaluación Ambiental: Energía Incorporada y Emisiones de CO₂

Los factores de energía y emisión presentados en la Tabla C.1 fueron estimados a partir de una combinación de fuentes nacionales e internacionales. En particular, se utilizaron datos del Inventario de Ciclo de Vida para Materiales de Construcción en Chile elaborado por CEDEUS [3] y del documento Factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono publicado por el Ministerio del Medio Ambiente bajo el programa Huella Chile [63]. Estos valores fueron complementados con referencias internacionales, permitiendo representar adecuadamente el consumo energético incorporado y las emisiones de CO₂ equivalente por unidad de insumo.

Tabla C.1: Factores de energía y emisión por insumo.

Insumos	Unidad	Factor energía (kWh/unidad)	Factor emisión (kg CO ₂ e /unidad)
Cemento	kg	0,83	2,43
Agregados finos	m ³	4,48	0,78
Agregados gruesos	m ³	4,20	1,14
Malla acero	kg	1,85	7,91
Fibras PET reciclado	kg	0,143	0,0429

Las emisiones asociadas al transporte de insumos y a las actividades de construcción se estimaron considerando el consumo energético específico de cada etapa, tanto en maquinaria como en traslados. Para ello, se utilizaron factores de emisión diferenciados según el tipo de fuente energética utilizada en cada caso, como se muestra en la Tabla C.2.

Tabla C.2: Factores de emisión de gases de efecto invernadero según tipo de fuente de energía.

Fuente de energía	Factor
Electricidad	~0.28 kg CO ₂ e/kWh
Diésel	~0.267 kg CO ₂ e/kWh

La expresión siguiente se utilizó para estimar la huella de carbono correspondiente al transporte, se utilizó un factor de emisión referencial de 0,062 kg CO₂e/ton·km, correspondiente al transporte de carga en camión diésel de carga media, en línea con valores reportados por inventarios internacionales.

$$\text{Emisiones (kg CO}_2\text{e)} = \text{Masa (ton)} \times \text{Distancia (km)} \times \text{Factor emisión (kg CO}_2\text{e / ton}\cdot\text{km)}$$