



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
MORTERO REFORZADO CON FIBRAS DE PET TRATADAS
TÉRMICAMENTE**

POR

Paula Javiera Naipán Castro

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

Profesor Guía:
Dra. Meylí Valin Fernández
Dr. Carlos Andrés Medina Muñoz
Dr. Luis Enrique Merino Quilodrán

Enero 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Paula Javiera Naipán Castro

© 2024 Paula Javiera Naipán Castro

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

Esta memoria está dedicada a Luna y Teo.

Resumen

Cada año, la producción global de plástico supera las 400 millones de toneladas. De toda la producción, una gran fracción termina como desecho en vertederos o rellenos sanitarios. Cerca del 12% de estos residuos se queman y menos del 10% se reciclan, lo que resulta en la acumulación de residuos plásticos y conlleva graves problemas ambientales debido al tiempo que tardan en degradarse y a los humos tóxicos liberados en la incineración. Por esta razón, la inclusión de fibras plásticas provenientes de desechos en mezclas de construcción ha despertado gran interés, como una respuesta a la urgencia de gestionar eficientemente los residuos plásticos.

En este estudio se analizó el impacto de la adición de fibras de PET tratadas térmicamente en el mortero con el objetivo de caracterizar el comportamiento mecánico de este material. Para esto se elaboraron probetas de mortero a las cuales se les incorporó un 0,75% de fibras en peso, variando entre fibras sin tratamiento térmico y aquellas tratadas con agua caliente, microondas, y su combinación. Estas probetas se sometieron a ensayos de flexión y compresión a los 7 y 28 días de curado.

Aunque los tratamientos térmicos, especialmente el de microondas, mejoraron significativamente la resistencia a la tracción de las fibras, los ensayos de flexión y compresión con probetas de mortero revelaron que las fibras sin tratamiento térmico exhibieron las mejores resistencias. La reducción en la trabajabilidad de las mezclas y el aumento en el costo de la mezcla (4% al 43%) al agregar fibras de PET plantean desafíos económicos para su implementación a gran escala. Las conclusiones destacan la mejora en la resistencia mecánica permitiendo la implementación de estas fibras en distintas aplicaciones, pero la necesidad de subsidios gubernamentales para hacer atractiva la utilización de desechos plásticos reciclados en la construcción.

Palabras clave: Mortero, PET, Tratamiento térmico, Propiedades mecánicas.

Abstract

Every year, global plastic production exceeds 400 million tons. A significant fraction of this production ends up as waste in landfills. Approximately 12% of this waste is incinerated, and less than 10% is recycled, resulting in the accumulation of plastic waste and causing serious environmental problems due to their slow degradation and the release of toxic fumes during incineration. For this reason, the inclusion of plastic fibers derived from waste in construction mixes has garnered significant interest as a response to the urgent need for efficient plastic waste management.

This study analyzed the impact of adding thermally treated PET fibers to mortar with the goal of characterizing the mechanical behavior of this material. Mortar specimens were prepared with the incorporation of 0.75% fiber by weight, varying between fibers without thermal treatment and those treated with hot water, microwave, and their combination. These specimens underwent flexural and compression tests at 7 and 28 days of curing.

Although thermal treatments, especially microwave treatment, significantly improved the tensile strength of the fibers, flexural and compression tests revealed that untreated fibers exhibited the best resistances. The reduction in the workability of the mixes and the increased cost of the mix (4% to 43%) when adding PET fibers pose economic challenges for large-scale implementation. The conclusions highlight the improvement in mechanical properties, enabling the implementation of these fibers in various applications, but underscore the need for government subsidies to make the use of recycled plastic waste in construction economically viable.

Keywords: Mortar, PET, Heat treatment, Mechanical properties.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario	vii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Planteamiento el problema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Metodología de trabajo	3
1.5 Carta Gantt.....	4
2 CAPÍTULO 2: Marco teórico	5
2.1 Mortero	5
2.2 Normativa Nacional.....	5
3 CAPÍTULO 3: Estado del arte	12
3.1 Mortero con agregados reciclados	12
3.2 Geometría de la fibra de refuerzo	14
3.3 Tratamiento térmico fibra PET.....	16
4 CAPÍTULO 4: Materiales y métodos.....	18
4.1 Diseño experimental	18
4.2 Materiales	18
4.3 Proporciones de la mezcla	19
4.4 Tratamiento térmico de la fibra PET	20
4.5 Ensayo de tracción de la fibra PET.....	21
4.6 Confección.....	22
4.7 Ensayo de cono de Abrams.....	24
4.8 Ensayo de flexión	24
4.9 Ensayo de compresión	25
5 CAPÍTULO 5: Resultados y análisis	26
5.1 Caracterización mecánica fibra PET	26
5.2 Ensayo de cono de Abrams.....	26
5.3 Ensayo de flexión	28
5.4 Ensayo de compresión	29

5.5 Fisuración	32
6 CAPÍTULO 5: Análisis de costos y viabilidad	34
6.1 Costos	34
6.2 Viabilidad de implementación.....	35
7 CAPÍTULO 6: Conclusiones	37
Referencias	38
Anexo A: Resultados ensayos de tracción.....	41
Anexo B: Resultados ensayos de flexión.....	42
Anexo C: Resultados ensayos de compresión.....	43
Anexo D: Análisis económico.....	44

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Carta Gantt	4
Tabla 3.1: Revisión bibliográfica de resistencia a la compresión y flexión del mortero con agregado de fibra PET.	13
Tabla 3.2: Investigaciones sobre tratamiento térmico en fibra PET para refuerzo del concreto.	17
Tabla 4.1: Proporciones de la mezcla patrón.	19
Tabla 4.2: Proporciones de las mezclas con agregado de fibra PET.....	19
Tabla 5.1: Resistencia a la tracción para cada fibra.	26
Tabla 5.2: Tabla de referencia de asentamiento del mortero.	27
Tabla 5.3: Resultados prueba de asentamiento.	27
Tabla 5.4: Resultados ensayo de flexión.....	28
Tabla 5.5: Resultados ensayos de compresión.	30
Tabla 6.1: Precios de referencia de las principales empresas de cemento del país.	34
Tabla 6.2: Costos asociados para la fabricación un metro cúbico de cada espécimen con respecto al patrón.....	35
Tabla A.1: Resultados ensayos de tracción.....	41
Tabla A.2: Resultados ensayos de flexión para cada probeta.....	42
Tabla A.3: Resultados ensayos de compresión para cada probeta.....	43
Tabla A.4: Precios de referencia de los componentes.....	44
Tabla A.5: Cantidades necesarias para confeccionar un metro cúbico.....	44
Tabla A.6: Consumo de agua.....	45
Tabla A.7: Consumo de gas.....	45
Tabla A.8: Consumo de electricidad.....	45
Tabla A.9: Costos asociados a cada mezcla.....	46

Lista de Figuras

Figura 2.1: Molde para mortero.	7
Figura 2.2: Molde para determinar el asentamiento.	8
Figura 2.3: Medida de asentamiento	9
Figura 2.4: Dispositivo de carga de probetas.	10
Figura 2.5: Disposición de la probeta para el ensayo de compresión	11
Figura 3.1: Geometría de las fibras PET recicladas. (a) Tipo recto (0.5 mm x 1 mm x 50 mm), (b) tipo ondulado (0.3 mm x 1.2 mm x 50 mm), y (c) tipo estampado (0.2 mm x 1.3 mm x 50 mm).	15
Figura 3.2: Patrón superficial de las fibras PET después del ensayo de extracción. (a) Control, (b) rectas, (c) tipo ondulado y (d) tipo estampado.	15
Figura 3.3: Dimensiones de la fibra de diferentes geometrías: (a) lámina de corte recto, (b) extremo aplanado con ranura, (c) lámina con ranura deformada, y (d) lámina con extremo ondulado.	16
Figura 4.1: Fibra de PET reciclado.	19
Figura 4.2: Fibras PET utilizadas en cada mezcla: (a) sin tratamiento; (b) con tratamiento de agua caliente; (c) con tratamiento de microondas; (d) con tratamiento combinado de agua caliente y microondas.	21
Figura 4.3: Ensayo de tracción de fibra plástica en máquina de ensayos universales ProLine Z005.	22
Figura 4.4: Amasado de la mezcla con fibra PET.	22
Figura 4.5: Compactación de moldes.	23
Figura 4.6: Probetas listas para desmoldar.	23
Figura 4.7: Ensayo de cono de Abrams.	24
Figura 4.8: Ensayo de flexión.	25
Figura 4.9: Ensayo a compresión.	25
Figura 5.1: Resistencia a la flexión para cada espécimen.	29
Figura 5.2: Resistencia a la compresión para cada espécimen.	31
Figura 5.3: Muestras ensayadas de (a) MTPET-1, y (b) MTPET-3.	32
Figura 5.4: Patrones de falla para (a) mortero patrón; y (b) mortero con agregado de fibra PET.	33
Figura 5.5: Separación de las partes de probeta con agregado de fibra PET.	33
Figura 5.6: Forma de falla de una probeta.	33

Glosario

MR00	:	Mortero patrón
MUPET	:	Mortero con fibra PET sin tratamiento térmico
MTPET-1	:	Mortero con fibra PET con tratamiento térmico de agua caliente
MTPET-2	:	Mortero con fibra PET con tratamiento térmico de microondas
MTPET-3	:	Mortero con fibra PET con tratamiento térmico de agua caliente y microondas
NCh	:	Norma Chilena
PNUMA	:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PET	:	Tereftalato de Polietileno
SEM	:	Microscopía electrónica de barrido
TPET-1	:	Fibra PET con tratamiento térmico de agua caliente
TPET-2	:	Fibra PET con tratamiento térmico de microondas
TPET-3	:	Fibra PET con tratamiento térmico de agua caliente y microondas
UPET	:	Fibra PET sin tratamiento térmico
σ	:	Resistencia a la tracción
s	:	Desviación estándar

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Planteamiento el problema

En las últimas décadas, ha existido un constante incremento en la producción de plásticos debido a su diversidad de aplicaciones, bajo costo, flexibilidad, durabilidad y globalización de la industria [1]. Sin embargo, estos aspectos positivos se ven opacados por sus efectos perjudiciales en el medio ambiente [2]. Según el reporte del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se producen más de 400 millones de toneladas de plástico a nivel mundial, donde el mayor sector industrial corresponde a plásticos de embalaje, los cuales son fabricados como plásticos de un solo uso. De toda la producción, una gran fracción termina como desecho en vertederos, rellenos sanitarios o en la naturaleza. Cerca del 12% de estos residuos se queman y menos del 10% se reciclan [3], lo que resulta en la acumulación de residuos plásticos y conlleva graves problemas ambientales debido al tiempo que tardan en degradarse y a los humos tóxicos liberados en la incineración, los cuales son perjudiciales para la salud y el medio ambiente [2]. Incluso con una disposición adecuada, los residuos plásticos necesitan alrededor de 400 a 500 años para degradarse [4].

Los principales problemas que surgen de este nivel de producción de residuos son el almacenamiento y la eliminación. El incremento en la cantidad de desechos plásticos ha llevado a la necesidad de encontrar métodos seguros y adecuados para su disposición. Por esta razón, investigadores han dirigido sus estudios en proponer formas de reciclar los residuos plásticos para distintas aplicaciones, ya sea como material reciclado o como aditivos en productos existentes, con el fin de aprovechar recursos y preservar el medio ambiente [5]. De estas investigaciones, la incorporación de materiales de desecho en derivados del cemento es una de las principales estrategias propuestas para la gestión de residuos en el mundo [6], debido a que el cemento es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizados a nivel global, presente en edificios, puentes, estacionamientos, pasillos industriales y otras estructuras [7].

Según la influencia de la temperatura, los plásticos se pueden clasificar en dos grupos: termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos pueden fundirse y solidificarse mediante cambios de temperatura, mientras que los plásticos termoestables no pueden modificarse de esta manera una vez formados [8]. Dentro de los termoplásticos, uno de los más comunes es el tereftalato de polietileno (PET), el cual es utilizado normalmente para fabricar botellas de plástico, envases de alimentos y fibras textiles [1].

En un esfuerzo por reciclar las botellas de PET, se han realizado numerosas investigaciones para estudiar el comportamiento de derivados del cemento al agregar o reemplazar materiales utilizando el PET en forma de agregados finos, agregados gruesos o fibras [6].

Las investigaciones sugieren que un aumento del contenido de PET en forma de fibra o agregado superior al 10% disminuye la resistencia del concreto. Por otro lado, se ha observado que la inclusión de fibras y agregados de PET en volúmenes bajos, ya sea como reemplazo parcial o adicional, puede mejorar tanto la resistencia como la durabilidad del concreto [6].

En relación con las mezclas de mortero que incluyen agregados de fibra PET reciclada, se han realizado múltiples estudios con resultados diversos en cuanto a su efecto en las propiedades de resistencia. Se destaca una reducción en la resistencia a la compresión cuando se sustituye el árido por fibra, aunque se observa una mejora en el comportamiento a flexión [11], [12].

A partir de varias revisiones, se presume que la razón principal detrás de todos los cambios en las propiedades del mortero y el concreto es la débil unión entre los áridos plásticos y la mezcla de cemento [1]. Investigaciones han analizado el efecto de la geometría y los tratamientos térmicos para mejorar la adherencia. Se encontró que variar la geometría de la fibra, en lugar de un corte recto, así como aplicar tratamientos térmicos, resultaron en una mejor unión, lo que condujo a mejoras significativas en las resistencias a la compresión y a la flexión [13], [14].

Pese a que las investigaciones indican que los tratamientos térmicos podrían ser una solución para el problema de adherencia del plástico a la mezcla, los estudios sobre derivados del cemento con agregados de fibra PET tratada térmicamente son limitados. Por esta razón, este estudio busca ampliar la comprensión de los efectos de los tratamientos térmicos del PET en las propiedades mecánicas de flexión y compresión del mortero reforzado con estas fibras plásticas recicladas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar un estudio experimental sobre las propiedades mecánicas de flexión y compresión del mortero reforzado con fibras de PET tratadas térmicamente.

1.2.2 Objetivos específicos

A continuación, se presentan los objetivos específicos de este estudio:

- OE1: Realizar una caracterización mecánica de la resistencia a la tracción de las fibras de PET tratadas térmicamente.
- OE2: Identificar las fibras tratadas térmicamente que exhiben una mayor resistencia mecánica y, mediante la revisión de la literatura, determinar las proporciones óptimas que proporcionan las mejores resistencias para su uso como refuerzo en el mortero.
- OE3: Realizar ensayos de compresión y tracción por flexión con las proporciones determinadas.
- OE4: Realizar un análisis de costos y de viabilidad del uso de las fibras de PET tratadas térmicamente como refuerzo del mortero.

1.3 Hipótesis

Incorporar fibras de PET tratadas térmicamente a la mezcla de mortero mejora las propiedades mecánicas del mortero.

1.4 Metodología de trabajo

OE1-OE2: Revisión bibliográfica y selección de tratamiento térmico

En primera instancia, se realizará una revisión de la literatura e investigaciones relacionadas al tema referente que permita establecer la base de lo que se ha investigado. Utilizando la información reunida se realizará una comparación de los tratamientos térmicos aplicados al PET en las investigaciones y sus resultados para encontrar el más adecuado a este estudio.

OE1: Caracterización mecánica del PET

Se fabricarán tiras de botellas PET y se le aplicará el tratamiento seleccionado para realizar ensayos de tracción que permitan caracterizar el PET tratado térmicamente y compararlo con las propiedades sin el tratamiento.

OE2: Definir proporciones

Utilizando la información reunida durante la revisión bibliográfica, se compararán las distintas proporciones de las mezclas realizadas en las investigaciones junto a los resultados obtenidos y se seleccionará el que mejor se adapte al estudio.

OE3: Fabricación de probetas y realización de ensayo de cono de Abrams

Con las proporciones y tratamiento térmico definidos se fabricarán las probetas en el Laboratorio de Hormigón. Además, se realizará el ensayo de cono de Abrams con la mezcla.

OE3: Caracterización mecánica del mortero con fibras PET tratadas térmicamente

Cuando las probetas hayan cumplido con el tiempo de fraguado, se realizarán los ensayos de compresión y flexión para realizar la caracterización mecánica del material.

OE4: Análisis de costos y de viabilidad del uso de las fibras de PET tratadas térmicamente

Con los resultados obtenidos, se realizará una comparación de las propiedades mecánicas del mortero sin fibra PET, con fibra PET y con fibra PET tratada térmicamente. Además, se realizará una recopilación bibliográfica de costos de producción del mortero que permitan analizar la viabilidad del uso del mortero con fibras PET tratadas térmicamente.

CAPÍTULO 2: Marco teórico

En este capítulo se establecen las bases teóricas y definiciones que son esenciales para comprender los componentes y las metodologías aplicadas en el proyecto.

2.1 Mortero

Según la Norma Chilena, el mortero se define como una “mezcla constituida por cemento, arena y eventualmente otro material conglomerante que con adición de agua reacciona y adquiere resistencia” [15]. Este es ampliamente utilizado en la construcción para unir y unificar distintos elementos de albañilería, como ladrillos, bloques de concreto o piedra. Además, se utiliza para revestir superficies, así como para rellenar y nivelar espacios en construcciones.

2.2 Normativa Nacional

La producción de mortero está sujeta a la Norma Chilena 2256 (NCh 2256), que define los criterios generales que deben cumplir los morteros cuyo principal conglomerante es el cemento, así como los requisitos específicos según su uso en la construcción.

Esta norma clasifica y establece los criterios generales y específicos de acuerdo con su uso, incluyendo los requerimientos de los componentes como cemento, cal, arena, agua y aditivos. Asimismo, presenta los procedimientos de prueba para evaluar la resistencia a la compresión y la adherencia del mortero. Es importante mencionar que no detalla los requisitos para morteros con áridos o aditivos que contengan plásticos reciclados [15].

A continuación, se describen algunas de las especificaciones establecidas en la normativa nacional referentes a los materiales, proceso de fabricación y caracterización mecánica del mortero.

2.2.1 Materiales

Cada elemento del mortero desempeña un papel fundamental en sus propiedades. Por ello, la normativa nacional incluye normas específicas que abordan los requisitos y clasificaciones para cada componente. Se detallan algunas de las especificaciones a continuación:

- **Cemento**

Se define por la Norma Chilena como un “material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire” [16]. Los cementos se clasifican en cinco clases y dos grados, según su composición y resistencia, respectivamente.

La norma encargada de definir los términos relacionados con los cementos, su clasificación y especificaciones generales, cualquiera sea el uso a que se destinen, es la siguiente:

- NCh148.Of68: Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales [16].

En cuanto a las especificaciones para garantizar la correcta fabricación de las probetas con este material, se establece que debe almacenarse en un envase cerrado y protegerse de la humedad hasta el momento del ensayo.

- **Áridos**

Se define como un material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaños estables. Existen dos tipos de áridos, naturales y tratados, y dependiendo del tamaño de las partículas se pueden clasificar en áridos finos o gruesos. En el caso del mortero, se emplea arena, clasificada como árido fino, al poder pasar a través de un tamiz con abertura nominal de 5 mm y retenerse en el tamiz de 0,080 mm.

En la mezcla de mortero, los áridos ocupan seis de las nueve partes en proporción de peso, mientras que las otras tres partes se distribuyen en dos partes de cemento y una de agua. Por esta razón, muchas de las cualidades del mortero están ligadas a las características de los áridos [17].

La norma NCh163.Of2013 [18], titulada “Áridos para morteros y hormigones – Requisitos”, como su nombre indica, define los criterios que deben cumplir los áridos para morteros y hormigones, centrándose en aquellos con densidades comprendidas entre 2000 y 3000 kg/m^3 . Además, clasifica los áridos según su fracción granulométrica, el porcentaje de partículas chancadas y el proceso de producción al que han sido sometidos.

Es fundamental resaltar que esta norma no aborda los requisitos específicos que se aplican a áridos especiales, tales como áridos reciclados, áridos artificiales, áridos pesados y áridos livianos. Por ende, no proporciona pautas para la utilización de fibra de PET reciclada.

- **Agua**

El agua desempeña un papel importante en la mezcla, ya que contribuye en la hidratación del cemento y en la fluidez de la pasta. Esta interacción es fundamental para una manejabilidad adecuada del concreto [19].

Las aguas que se pueden emplear en la preparación del mortero pueden ser agua potable, agua recuperada de procesos de la industria del hormigón o una combinación de ellas. Es importante que, en el caso de que las agua presenten aceite, grasas o detergente, sean sometidas a ensayos de comportamiento de tiempo de fraguado y resistencia mecánica. Todo esto se detalla en la norma NCh 1498-2012 [20], titulada “Hormigón y mortero - Agua de amasado – Clasificación y requisitos”.

Adicionalmente, el agua es utilizada para el proceso de curado, el cual implica mantener un contenido de humedad y temperatura en un mortero recién colocado para permitir su óptimo desarrollo de propiedades [21].

2.2.2 Fabricación

Todos los aspectos referentes al proceso de preparación, protección, curado de las probetas de mortero, así como el método de transporte desde el laboratorio y su curado, están definidas en las siguientes normas:

- NCh 2261-2010: Morteros – Confección de probetas en obra y determinación de la resistencia a compresión [22].
- NCh158.Of67: Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento [23].

A continuación, se detallan algunas de las principales consideraciones establecidas en estas normativas.

- **Moldes**

Los moldes estarán divididos en tres compartimientos prismáticos que permitan confeccionar tres probetas, como se muestra en la Figura 2.1. Es importante que estos moldes estén fabricados con un material que sea resistente a la acción del mortero de cemento. Además, las dimensiones internas de cada uno de los compartimientos de los moldes serán de 40 mm x 40 mm x 160 mm.

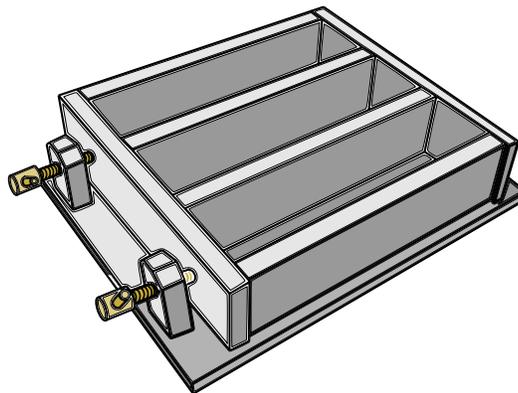


Figura 2.1: Molde para mortero.

- **Acondicionamiento**

Dentro de las regulaciones, se asigna una importancia significativa a la temperatura y humedad dentro de la sala de trabajo. Se requiere que la temperatura se mantenga en un rango entre 18°C y 27°C, y la humedad relativa no debe descender por debajo del 50%.

Adicionalmente, se especifica el procedimiento para agregar los materiales al mezclador, así como el tiempo y la velocidad de mezclado.

- **Probetas**

Además del proceso de preparación, que incluye los pasos para llenar los moldes, se destaca el método de conservación o curado de las probetas. Las probetas deben ser retiradas de los moldes y sumergidas en posición vertical en agua saturada en cal a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta el momento del ensayo. Es esencial que el agua tenga acceso libre a todas las caras de las probetas y que estas solo se saquen del agua en un período inferior a 15 minutos antes del ensayo [23].

Los ensayos de resistencia mecánica se efectúan generalmente en probetas con 28 días de fabricados, aunque también es posible realizarlos en edades más tempranas, como 3, 7 o 14 días, o en edades más tardías, como 90 y 120 días [17].

2.2.3 Ensayo de cono de Abrams

Para determinar la consistencia de la mezcla se emplea el ensayo de cono de Abrams. Todo esto de acuerdo con las normas:

- NCh171.EOf75: Hormigón – Extracción de muestras de hormigón [24].
- NCh1019.Of2009: Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento del cono de Abrams [25].
- NCh2257/3.Of96: Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 3: Método de asentamiento del cono [26].

Para esto se utiliza un molde troncocónico, abierto en ambos extremos, en el cual se introduce una muestra de mortero fresco que luego es compactada. Para mezclas de mortero, el molde tiene una base inferior de 100 mm, una base superior de 50 mm y una altura de 150 mm. En la Figura 2.2 se presenta el diseño del molde para determinar el asentamiento.

El molde es elevado permitiendo que el mortero se asiente, experimentando un descenso. Este descenso sirve como indicador de la docilidad, es decir, la facilidad con la que la mezcla puede ser transportada, colocada y compactada sin que se produzca segregación. La medida de este descenso se registra como la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie del mortero, como se muestra en la Figura 2.3.

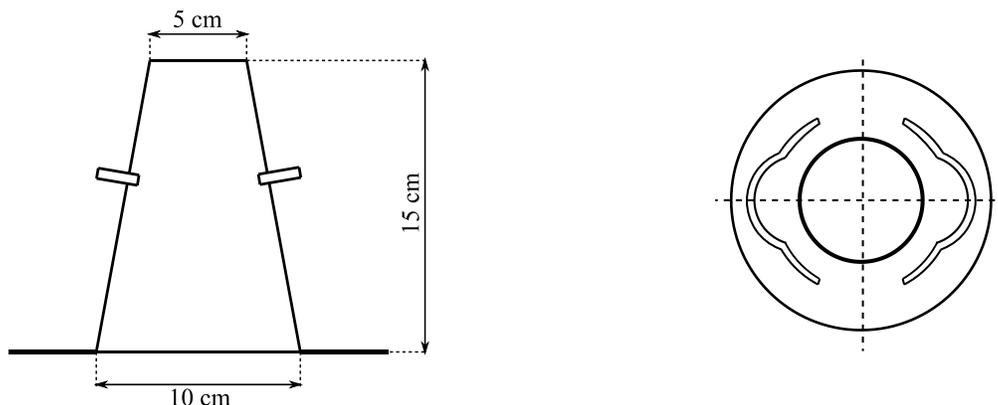


Figura 2.2: Molde para determinar el asentamiento [25].

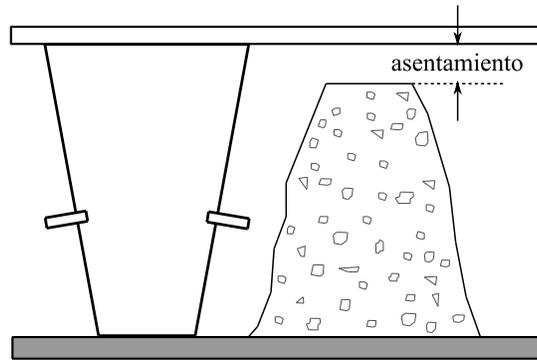


Figura 2.3: Medida de asentamiento [25].

2.2.4 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión del mortero se realiza para evaluar la resistencia a la flexión y la capacidad de deformación de una muestra de mortero endurecido.

Las pautas y procedimientos para medir la resistencia a la flexión y a la compresión en morteros están establecidos en la norma NCh158.Of67, denominada "Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento" [23].

La máquina para ensayos de flexión está equipada con dos rodillos de apoyo de 10 mm de diámetro, ubicados a una distancia de 100 mm o 106,7 mm, y un rodillo superior de igual diámetro equidistante de los de apoyo. Estos rodillos pueden moverse alrededor de su centro para garantizar una distribución uniforme de las cargas. Este dispositivo de carga se presenta en la Figura 2.4

Para realizar el ensayo la probeta debe ser colocada sobre los rodillos de apoyo de la máquina a flexión, apoyada en una de las caras laterales del molde. La carga se aplica a través del rodillo superior con una velocidad de carga de 5 ± 1 kg/s.

Posteriormente, los fragmentos de las probetas que se han fracturado durante la flexión deben mantenerse húmedos hasta el momento en que sean sometidos a ensayo de compresión.

Para determinar la resistencia a la flexión, es necesario realizar el ensayo en un mínimo de tres probetas para cada edad especificada en el ensayo de flexión.

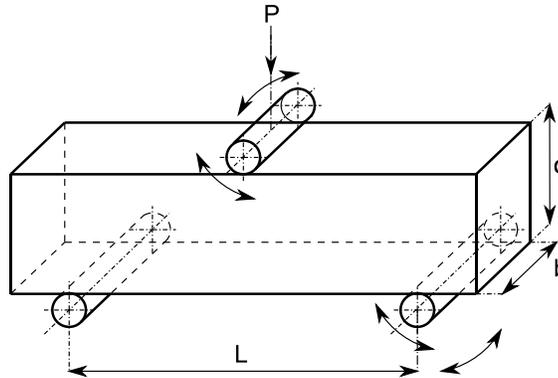


Figura 2.4: Dispositivo de carga de probetas [27].

La resistencia a la flexión se expresa en kgf/cm^2 y se calcula utilizando la ecuación (1).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

Donde P es la carga máxima de flexión, L, b y d son la longitud soportada, el ancho y la profundidad del punto de falla, respectivamente.

2.2.5 Ensayo de compresión

En el caso del ensayo de compresión, se trabaja con los trozos obtenidos del ensayo de flexión. Por esta razón, se requiere un mínimo de seis probetas para ser ensayadas en cada edad.

El aparato encargado de ubicar las probetas posee un sistema de placas rectangulares que se posiciona entre los platillos de la máquina utilizada para el ensayo de compresión. Este sistema está compuesto por dos placas de presión. El dispositivo es presentado en la Figura 2.5.

Cada fragmento se somete a ensayo de compresión en una sección de 40×40 mm, aplicando la carga en ambas caras provenientes de los laterales del molde, y colocándolo entre las placas de la máquina de compresión.

La velocidad de carga se ajusta para que la presión sobre la probeta aumente en un rango de 10 a 20 $\text{kg}/\text{cm}^2/\text{s}$. Hasta alcanzar la mitad de la carga de ruptura, la carga puede aumentar a una velocidad superior. No obstante, la duración de cada ensayo no excede los 10 segundos en ningún caso.

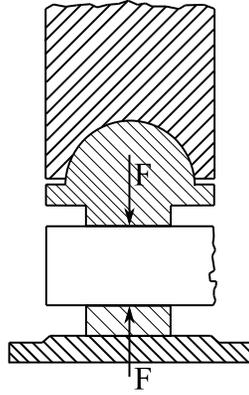


Figura 2.5: Disposición de la probeta para el ensayo de compresión [23].

CAPÍTULO 3: Estado del arte

En el contexto de la investigación sobre la incorporación de desechos plásticos en elementos de construcción, el presente estado del arte tiene como objetivo resaltar los avances y desarrollos más destacados que han influido en la comprensión de la problemática asociada con la utilización de refuerzos de fibra plástica en los morteros.

3.1 Mortero con agregados reciclados

Continuamente se busca mejorar las propiedades de los materiales empleados en la construcción. Para ello, se recurre a diversos tipos de agregados en las mezclas, que van desde materiales orgánicos derivados de plantas, como la fibra de coco y la lana, hasta residuos industriales, como diferentes tipos de gomas, alambres y plásticos. A continuación, se revisarán algunos estudios centrados en el fortalecimiento del mortero mediante la incorporación de agregados reciclados provenientes de varios tipos de residuos.

Spadea *et al.* [28] investigaron el uso de fibras de nailon reciclado de redes de pesca en morteros de cemento. Variaron la longitud de las fibras y el porcentaje de agregado en peso. Encontraron que mayores longitudes y cantidades de fibras redujeron la trabajabilidad, pero mejoraron el comportamiento en flexión. Aunque la resistencia a la compresión disminuyó hasta un 37%, observaron un aumento significativo del 35% en la resistencia a la tracción y mejoras en las propiedades de fractura.

Naser *et al.* [29] incorporaron fibras recicladas de cobre y acero galvanizado en mortero de cemento para mejorar la resistencia. Encontraron mejoras considerables en la resistencia a la compresión con la adición de fibras, entre el 11% y el 24%, siendo óptima la proporción del 1,5% de fibras de cobre. La resistencia a la flexión aumentó significativamente, especialmente con combinaciones híbridas, alcanzando un aumento del 118% con un 30% de fibras de cobre y 70% de fibras de acero a un 1,5% de fracción de volumen. La resistencia a la tracción directa aumentó notablemente, entre un 21% y un 173%, siendo las fibras de acero más efectivas. Concluyeron que la inclusión de estas fibras recicladas es efectiva para mejorar propiedades mecánicas del mortero.

Ranjan *et al.* [30] utilizaron fibras de PET reciclado en mortero para mejorar la unión en albañilería. A pesar de que todas las muestras de mortero reforzado mostraron menor resistencia a la compresión que la muestra de control, observaron una mejora significativa en la resistencia a la flexión en todas las muestras reforzadas. Atribuyeron la disminución en la resistencia a la compresión a la reducción del contenido de cemento y aumento de porosidad, pero destacaron la efectividad de las fibras de PET para mejorar las propiedades de flexión del mortero.

3.1.1 Mortero con agregados de fibra PET

La inclusión de fibra PET en mezclas de construcción ha generado gran interés debido a la urgencia de gestionar eficientemente los residuos plásticos. El plástico proveniente de botellas se ha utilizado como reemplazo de materiales, ya sea áridos finos o gruesos, así como en calidad de agregado. En el contexto de este último uso, se presenta en la Tabla 3.1 el comportamiento de la resistencia a la compresión y a la flexión del mortero con agregado de fibra PET, respectivamente, según lo informado por diversos investigadores [30], [31], [32]. El número mostrado en el espécimen, X/Y, corresponde al largo de la fibra en milímetros, X, y el porcentaje de agregado en peso, Y.

Se observa que la adición de fibra a la mezcla de conlleva a una reducción en la resistencia a la compresión en la mayoría de los casos presentados, con disminuciones que alcanzan cerca del 40%. En contraste, para el comportamiento a la flexión, se observa una mejora generalizada en la resistencia cuando se incorporan fibras a la mezcla.

Tabla 3.1: Revisión bibliográfica de resistencia a la compresión y flexión del mortero con agregado de fibra PET.

Estudio	Espécimen	Edad [días]	Resistencia a la compresión [MPa]	Variación c/r al patrón	Resistencia a la flexión [MPa]	Variación c/r al patrón
Zerig et. al. (2023)	Patrón	28	38,205	-	6,839	-
	20/0,5	28	36,974	-3,2%	6,587	-3,7%
	20/1	28	37,161	-2,7%	6,577	-3,8%
	20/1,5	28	36,648	-4,1%	6,796	-0,6%
	20/2	28	36,135	-5,4%	6,91	1,0%
	30/0,5	28	34,927	-8,6%	8	17,0%
	30/1	28	33,529	-12,2%	7	2,4%
	30/1,5	28	33,999	-11,0%	7,601	11,1%
Orasutthikul et. al. (2017)	Patrón	28	65,7	-	4,8	-
	30/1	28	65,2	-0,8%	4,9	2,1%
	30/1,5	28	60,2	-8,4%	5,2	8,3%
	40/1	28	66,2	0,8%	5,3	10,4%
	40/1,5	28	60,8	-7,5%	5,9	22,9%
Ranjan et. al. (2023)	Patrón	7	17,93	-	2,27	-
		28	24,81	-	2,66	-
	18/0,10	7	13,51	-24,7%	2,33	2,6%
		28	21,49	-13,4%	2,66	0,0%
	35/0,10	7	12,34	-31,2%	2,35	3,5%
		28	20,63	-16,8%	2,99	12,4%
	18/0,25	7	13,01	-27,4%	2,44	7,5%
		28	20,91	-15,7%	2,84	6,8%
35/0,25	7	11,69	-34,8%	2,51	10,6%	
	28	18,93	-23,7%	2,97	11,7%	

	18/0,5	7	11,63	-35,1%	2,28	0,4%
		28	18,06	-27,2%	2,69	1,1%
	35/05	7	10,81	-39,7%	2,33	2,6%
		28	19,48	-21,5%	3,02	13,5%
	18/0,75	7	12,01	-33,0%	2,45	7,9%
		28	17,12	-31,0%	2,81	5,6%
	35/0,75	7	11,98	-33,2%	2,53	11,5%
		28	17,01	-31,4%	3,23	21,4%
	18/1	7	11,85	-33,9%	2,32	2,2%
		28	16,08	-35,2%	3,03	13,9%
	35/1	7	12,02	-33,0%	2,42	6,6%
		28	18,26	-26,4%	3,13	17,7%

3.2 Geometría de la fibra de refuerzo

La geometría de la fibra ha sido objeto de investigación. Esto se debe a que el principal desafío al incorporar láminas de plástico PET en las mezclas de mortero y hormigón radica en la baja resistencia de unión con la matriz de la mezcla. Por esta razón, la modificación de la geometría y la superficie de la fibra es un tema relevante para mejorar el anclaje y, en consecuencia, las propiedades del material. Las geometrías más comunes incluyen fibras rectangulares lisas y fibras con forma de hojuelas. Sin embargo, también existen estudios que comparan diversas geometrías y patrones.

En el estudio de Kim *et. al.* [33], se examinaron tres geometrías de fibra de PET reciclado para evaluar su impacto en las propiedades mecánicas del concreto. Estas geometrías se presentan en la Figura 3.1. La fibra estampada mostró una resistencia mecánica de unión significativamente mayor durante las pruebas de adherencia, esto debido al aumento en la energía superficial de la fibra debido a la fricción durante la extracción del área estampada o con relieve unida al cemento.

Se examinó la superficie de la fibra después de la prueba de extracción usando microscopía electrónica a 1000x. La fibra recta mostró un rayado mínimo en comparación con las otras formas de fibra debido a su baja superficie y resistencia a la fricción, como se presenta en la Figura 3.2.

La fibra estampada, con la mayor resistencia mecánica de unión, demostró la mejor capacidad para controlar la fisuración por retracción plástica. Esto sugiere que, cuando todas las demás variables se mantienen constantes, la geometría de la fibra y su resistencia mecánica de unión influyen en la fisuración por retracción plástica en compuestos de cemento. Sin embargo, una vez que la fracción de volumen de fibra supera el 0,5%, se incorpora un número suficiente de fibras para controlar la fisuración por retracción plástica, y la geometría de la fibra no ejerce un efecto adicional.

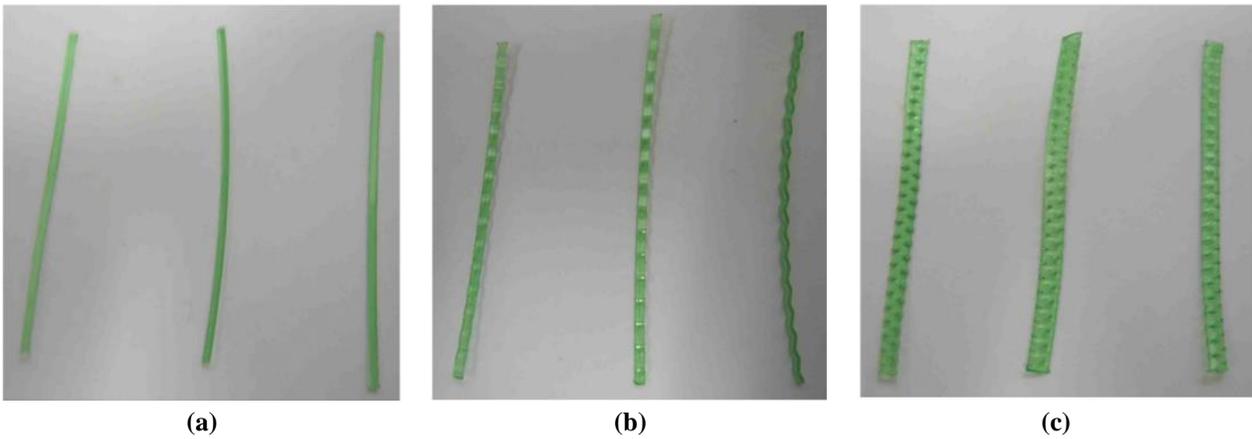


Figura 3.1: Geometría de las fibras PET recicladas. (a) Tipo recto (0.5 mm x 1 mm x 50 mm), (b) tipo ondulado (0.3 mm x 1.2 mm x 50 mm), y (c) tipo estampado (0.2 mm x 1.3 mm x 50 mm) [33].

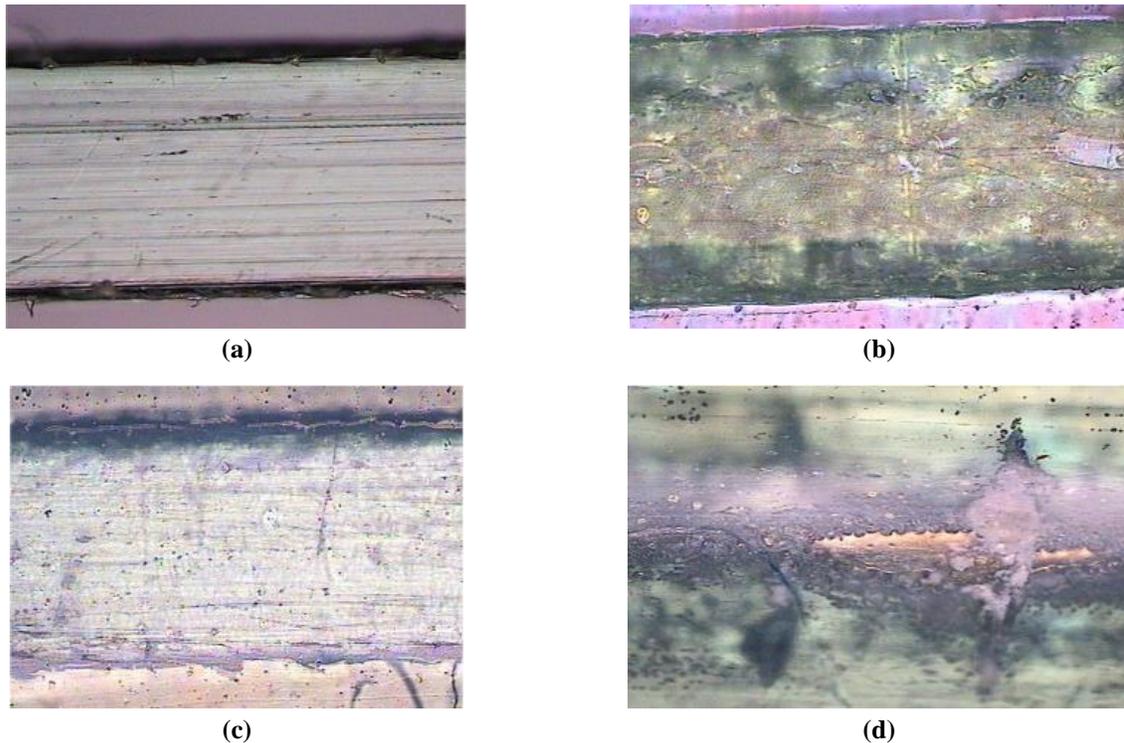


Figura 3.2: Patrón superficial de las fibras PET después del ensayo de extracción. (a) Control, (b) rectas, (c) tipo ondulado y (d) tipo estampado [33].

En el trabajo de Marthong y Sarma [13], se investigó cómo la geometría de la fibra afecta las propiedades mecánicas del concreto. Se evaluaron cinco formas distintas, las que se presentan en la Figura 3.3, todas diseñadas siguiendo pautas similares a las de las fibras de acero establecidas por el Comité 544 del Instituto Americano del Concreto.

compresión y a la flexión del concreto cuando incorporaba las inclusiones tratadas, y esta mejora fue más significativa a temperaturas de tratamiento más altas.

Un aspecto interesante fue que la presencia de inclusiones tratadas redujo la profundidad de penetración en el concreto en los ensayos de resistencia al impacto, indicando una mayor densificación en la zona. Además, se observó una disminución en el área del cráter en todos los tipos de concreto con inclusiones de PET tratadas.

En la investigación de Abu-Saleem *et. al.* [34] aplicaron un tratamiento por radiación de microondas a distintos áridos plásticos reciclados, entre ellos el PET. Este método se utilizó para modificar la superficie del plástico reciclado antes de incorporarlo al concreto. La radiación de microondas se basa en la capacidad del plástico para absorber esta energía y convertirla en calor, lo que cambia sus propiedades superficiales.

El examen visual reveló cambios evidentes en la textura y forma del agregado de PET tratado, mostrando una superficie más dura y bordes afilados. Asimismo, se observó que el tratamiento con microondas reducía la hidrofobicidad del PET, indicando una mayor mojabilidad de su superficie.

Este tratamiento influye en varias propiedades del concreto, como la trabajabilidad y las características mecánicas. Se observaron mejoras notables en la resistencia a la compresión y a la flexión cuando se incorporaron plásticos tratados en la mezcla, lo que se atribuyó a la modificación de la superficie del PET y a una mayor unión en la zona de transición.

De esta manera, los tratamientos térmicos se presentan como una estrategia prometedora para optimizar la utilización de plástico PET reciclado en la industria del concreto. Ya que no solo mejora las propiedades mecánicas del concreto, sino que también influye en su durabilidad, abriendo oportunidades para su aplicación en la construcción sostenible.

En la Tabla 3.2 se presenta un resumen de los estudios mencionados junto a sus especificaciones del tratamiento térmico.

Tabla 3.2: Investigaciones sobre tratamiento térmico en fibra PET para refuerzo del concreto.

Autor y año	Geometría	Tratamiento	Resultados
Smaoui <i>et. al.</i> (2023)	Tiras rectangulares de 50 × 20 mm	Agua caliente: Inmersión en agua caliente a temperatura constante durante 15 minutos. Se consideran cuatro temperaturas: 75°C, 100°C, 150°C y 200°C [14].	Aumento de la resistencia a la compresión y a la flexión. Mayor resistencia al impacto.
Abu-Saleem <i>et. al.</i> (2021)	Plástico triturado.	Microondas: Se puso el material en el microondas a 1100 W durante 5 minutos en dos tandas de 2 minutos y 30 segundos [34].	Mejoras en la resistencia a la compresión y a la flexión.

CAPÍTULO 4: Materiales y métodos

En este capítulo se presentarán los procedimientos utilizados para la realización de los trabajos de laboratorio, incluyendo los materiales utilizados para la fabricación de las muestras.

4.1 Diseño experimental

En este estudio, se pretende analizar el impacto de la adición de fibras de PET tratadas térmicamente en el mortero, evaluando diversas características tanto en estado fresco como endurecido. Se ha establecido una proporción de adición de fibras del 0,75% en peso, utilizando tres tipos de tratamientos térmicos: agua caliente, microondas y la combinación de ambos. Además, dentro de las probetas a fabricar se incluye el mortero patrón, es decir, sin agregado de fibra, y el mortero con fibra PET sin tratamiento térmico. Asimismo, se considerarán dos períodos de curado de 7 y 28 días. En total, se tiene previsto fabricar 30 probetas para este estudio. Estas probetas prismáticas se someterán a un estudio experimental para evaluar sus propiedades de flexión y compresión. Adicionalmente, se separará una porción de la mezcla en estado fresco para realizar un análisis de trabajabilidad.

4.2 Materiales

4.2.1 Cemento

Se utilizará Cemento Bío Bío Especial, el cual cumple con los requisitos de la norma NCh148.Of68, presentada en la sección 2.2.1.

4.2.2 Árido fino/Arena

Al tratarse de mortero, el árido fino a utilizar corresponde a arena y se utilizará la disponible en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción, asegurándose de que cumpla con el tamaño según el tamiz mencionado por norma en la sección 2.2.1.

4.2.3 Agua

El agua a utilizar corresponde a agua potable proveniente de la red pública, la cual cumple con la normativa NCh1498-2012 anteriormente mencionada.

4.2.4 Fibra PET

Se empleó como agregado la fibra PET obtenida a partir de botellas de plástico en desuso. Estas botellas fueron sometidas a un proceso de limpieza y posteriormente se cortaron en forma de fibras continuas o hilo, que luego se dividieron manualmente en pequeñas fibras de 35 mm de longitud y 2 a 3 mm de ancho, como se muestra en la Figura 4.1. Además, se les aplicaron tres tipos de tratamiento térmico que se describen en la sección 4.4.



Figura 4.1: Fibra de PET reciclado.

4.3 Proporciones de la mezcla

En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se presentan las cantidades a utilizar de cada material para las mezclas sin fibra, mortero patrón o de control, MR00, y las mezclas con agregado de fibra de 0,75% en peso, MR0.75, respectivamente, considerando las cantidades para la fabricación de seis probetas. La dosificación utilizada para la mezcla patrón corresponde a 1:3:0,5 en peso de cemento, arena y agua.

Tabla 4.1: Proporciones de la mezcla patrón.

MR00		
Cemento	0,950	kg
Arena	2,933	kg
Agua	0,392	kg
Fibra	0,000	g

Tabla 4.2: Proporciones de las mezclas con agregado de fibra PET.

MR0.75		
Cemento	0,950	kg

Arena	2,933	kg
Agua	0,392	kg
Fibra	35,27	g

4.4 Tratamiento térmico de la fibra PET

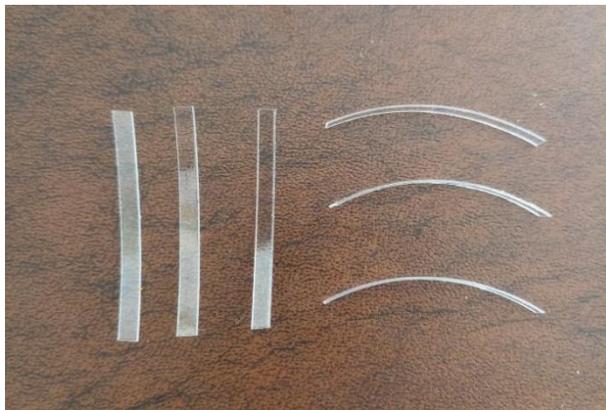
Los tratamientos térmicos seleccionados para aplicarse a la fibra fueron a los mencionados en la sección 3.3.

En el primer tratamiento térmico, se sumergió la fibra de PET en un recipiente con agua caliente a una temperatura constante de 100°C durante 15 minutos. Este procedimiento se llevó a cabo en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción.

En el segundo tratamiento térmico, se empleó la radiación de microondas. Para ello, se colocó la fibra en un microondas doméstico de la marca Thomas, modelo TH-20DM, ubicado en el Laboratorio de Mecánica Computacional de la Universidad de Concepción. El tratamiento se aplicó en dos tandas, cada una de 2 minutos y 30 segundos, sumando un total de 5 minutos de tratamiento.

Adicionalmente, se llevó a cabo una combinación de estos tratamientos, comenzando con el tratamiento térmico de agua caliente y luego aplicando el tratamiento con microondas.

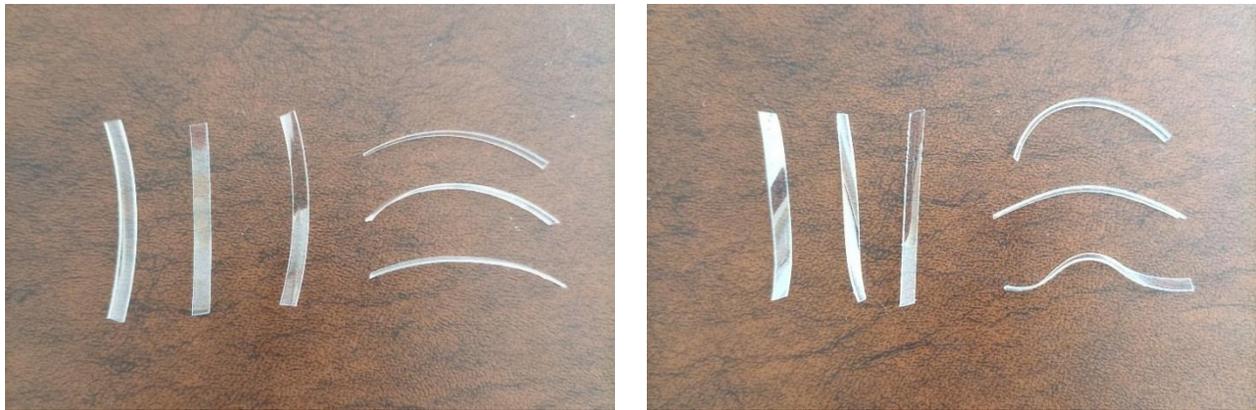
En la Figura 4.2a, Figura 4.2b, Figura 4.2c y Figura 4.2d se presentan las fibras utilizadas en cada mezcla luego de haber realizado los respectivos tratamientos térmicos.



(a)



(b)



(c) (d)
Figura 4.2: Fibras PET utilizadas en cada mezcla: (a) sin tratamiento; (b) con tratamiento de agua caliente; (c) con tratamiento de microondas; (d) con tratamiento combinado de agua caliente y microondas.

4.5 Ensayo de tracción de la fibra PET

Para llevar a cabo los ensayos de tracción, se empleó la máquina de ensayos universales ProLine Z005 de Zwick Roell, ubicada en el laboratorio de prototipos de la Universidad de Concepción, presentada en la Figura 4.3.

Los ensayos de tracción en plásticos se llevaron a cabo conforme a la norma ASTM D638, que establece los métodos de prueba estándar para las propiedades de tracción de plásticos. Sin embargo, es importante señalar que esta norma no incluye especificaciones para ensayos en fibras o hilos ni tampoco en material plástico reciclado, limitándose a probetas con la forma de "hueso de perro". Dado que no existe una normativa específica para estas fibras, se optó por seguir la misma norma.

Debido a que la geometría de las muestras no correspondía a la requerida por la norma, se llevaron a cabo 20 ensayos por cada tipo de fibra para tener una estadística adecuada.

Dado que se trata de un material dúctil, se eligió una velocidad de ensayo de $50 \pm 10\%$ mm/min, la cual corresponde a una de las velocidades indicadas en la Tabla 1 de la norma ASTM D638 para materiales no rígidos [35].

Estas pruebas se realizaron con el propósito de evaluar el efecto que tienen los diferentes tratamientos térmicos en la fibra de PET antes de su incorporación en la mezcla de mortero.



Figura 4.3: Ensayo de tracción de fibra plástica en máquina de ensayos universales ProLine Z005.

4.6 Confección

La confección de las probetas se llevó a cabo en el Laboratorio de Hormigón de la Universidad de Concepción. En el cálculo de la dosificación, se consideró una pérdida del 10%. Inicialmente, se midió la humedad de la arena para sustraerla de la cantidad de agua a agregar, realizando la corrección correspondiente. La medición reveló un porcentaje de humedad del 2,9%.

Se midieron las cantidades necesarias de los materiales, y se realizó el proceso de amasado iniciando con la combinación de arena y cemento. Posteriormente, se incorporó la fibra, a excepción de la mezcla patrón, y finalmente se añadió el agua. La integración se llevó a cabo gradualmente utilizando un mezclador de mortero con el fin de lograr una mezcla homogénea. En la Figura 4.4 se presenta parte del proceso de amasado para una mezcla con agregado de fibras.



Figura 4.4: Amasado de la mezcla con fibra PET.

La mezcla fresca se dispuso en el cono para realizar el ensayo de asentamiento. A continuación, se llenaron y compactaron los moldes utilizando la mesa de vibración durante ocho segundos, Figura 4.5, tiempo necesario para permitir la salida de la lechada en la superficie de las probetas.



Figura 4.5: Compactación de moldes.

Las probetas se dejaron fraguar a temperatura ambiente en el laboratorio durante tres días, cubiertas con plástico para conservar la humedad. Aunque el tiempo de fraguado para mezclas convencionales es de 24 horas, se optó por extender el período de fraguado al no existir normativas específicas para mezclas con agregado de fibras plásticas, con el fin de asegurar resultados óptimos.

Al cumplirse los tres días, se procedió al desmolde de las probetas, Figura 4.6, que posteriormente fueron colocadas en la cámara de curado durante el tiempo especificado.



Figura 4.6: Probetas listas para desmoldar.

4.7 Ensayo de cono de Abrams

Para obtener las propiedades del mortero fresco se realizó la prueba de asentamiento según la norma NCh 2257/3. Como se mencionó anteriormente, este proceso fue realizado luego de terminado el proceso de amasado de la mezcla.

En la Figura 4.7 se presenta el proceso de medición del asentamiento luego de retirado el cono de la mezcla.



Figura 4.7: Ensayo de cono de Abrams.

4.8 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión se llevó a cabo en el laboratorio de hormigón de la Universidad de Concepción, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma NCh158.Of67, como se muestra en la Figura 4.8. Se utilizaron tres muestras de cada combinación, con dimensiones de $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$, para evaluar la resistencia a la flexión a los 7 y 28 días. Cada muestra se sometió a pruebas en una máquina de ensayos manual hasta que se produjo la falla o la formación de una grieta, registrando la carga correspondiente al momento de la falla.

La determinación de la resistencia a la flexión se llevó a cabo mediante la ecuación (1) descrita en la sección 2.2.4. Se obtuvieron tres valores de resistencia para cada periodo de 7 y 28 días, y se determinó la resistencia a la flexión de cada mezcla como el promedio de estos valores.



Figura 4.8: Ensayo de flexión.

4.9 Ensayo de compresión

El ensayo a compresión se realizó en el laboratorio de hormigón de la Universidad de Concepción, utilizando la máquina de ensayo a compresión Controls junto con el bastidor modelo 50-C9030/H, mostrado en la Figura 4.9. Este dispositivo está diseñado específicamente para ensayos en fragmentos de prisma de mortero de dimensiones 40 x 40 x 160 mm que han sido fracturados por flexión [36]. El procedimiento se llevó a cabo conforme a la norma NCh158.Of67.

La evaluación de la resistencia a la compresión se realizó a los 7 y 28 días para todos los diseños de mezcla. Se sometieron a ensayo de compresión las seis mitades obtenidas por la rotura de los especímenes a flexión para cada edad. Es importante señalar que, debido al tipo de fractura observado en las probetas con fibras (detallado en la sección 5.5 y visible en la Figura 5.4b), fue necesario aplicar fuerza adicional para separar las probetas, lo que podría haber ocasionado alguna alteración parcial en las muestras.

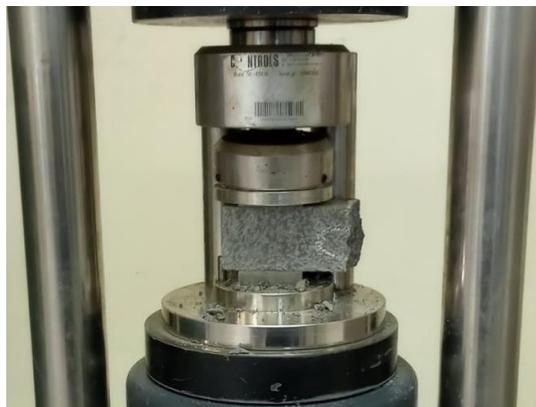


Figura 4.9: Ensayo a compresión.

CAPÍTULO 5: Resultados y análisis

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos en los ensayos de tracción de la fibra, ensayo de cono de Abrams de la mezcla, y ensayo de flexión y de compresión de las probetas, además de un análisis del tipo de fisuración producida en los distintos tipos de probetas.

5.1 Caracterización mecánica fibra PET

En la Tabla 5.1 se presentan los resultados promedios de la resistencia a la tracción para cada fibra, donde UPET, TPET-1, TPET-2 y TPET-3 corresponden a las fibras sin tratamiento térmico, fibras con tratamiento térmico del agua caliente, fibras con tratamiento térmico del microondas, y fibras con tratamiento térmico del agua caliente y el microondas, respectivamente. Los valores σ y s representan la resistencia a la tracción y la desviación estándar de los resultados, respectivamente. En el Anexo A se presentan los resultados de cada uno de los ensayos de tracción realizados.

Tabla 5.1: Resistencia a la tracción para cada fibra.

Tipo de fibra	UPET	TPET-1	TPET-2	TPET-3
σ [MPa]	79,4	109	120	98,3
s [MPa]	26,9	12,7	23,5	18,7

De estos resultados se puede observar que el tratamiento térmico del microondas fue el que mejores propiedades de resistencia a la tracción le otorgó a la fibra PET, aumentando aproximadamente un 51% con respecto a la fibra sin tratamiento térmico. Mientras que la combinación de tratamientos de agua caliente y microondas no generó mejoras con respecto a estos tratamientos por separado, sino que, por el contrario, resultó en una disminución de la resistencia a la tracción. No obstante, esta resistencia sigue siendo aproximadamente un 24% superior a la de la fibra sin tratamiento térmico.

5.2 Ensayo de cono de Abrams

El ensayo de cono o de asentamiento es una medida de la docilidad de la mezcla, determinando su capacidad para adaptarse a diversos usos y ser manejada con diferentes herramientas según las necesidades específicas. La Norma Chilena no incluye una tabla de referencia para la docilidad en el asentamiento del mortero. Por lo tanto, se presenta una tabla elaborada a partir de la normativa NCh170 [21], que establece la elección de equipos de compactación en función del asentamiento del cono de hormigón. La tabla Tabla 5.2 se confeccionó mediante la relación de alturas de los conos, considerando que el cono de hormigón mide 30 cm y el de mortero 15 cm.

Tabla 5.2: Tabla de referencia de asentamiento del mortero.

Docilidad	Asentamiento de cono [mm]
Seca	0 a 10
Plástica	15 a 25
Blanda	30 a 45
Fluida	50 a 75
Líquida	> 80

Los resultados de los ensayos de la prueba de asentamiento o ensayo de cono de Abrams se presentan en la Tabla 5.3, donde MR00 corresponde a la mezcla patrón, MUPET mezcla con fibra PET sin tratamiento térmico, MTPET-1 la mezcla con fibras PET con tratamiento térmico del agua caliente, MTPET-2 la mezcla con fibras PET con tratamiento térmico del microondas, y MTPET-3 la mezcla con fibras PET con tratamiento térmico del agua caliente y el microondas, respectivamente.

Tabla 5.3: Resultados prueba de asentamiento.

Espécimen	Asentamiento [mm]
MR00	10
MUPET	0
MTPET-1	0
MTPET-2	0
MTPET-3	0

De los resultados obtenidos se evidencia que las mezclas exhiben características propias de mezclas secas con baja trabajabilidad. Esto implica que se requerirá un mayor esfuerzo por parte de los operarios y las maquinarias para manipular eficientemente las mezclas.

Al realizar comparaciones entre las distintas mezclas, se observa que la presencia de fibras conlleva una reducción en el asentamiento en comparación con el mortero de control. De este modo, se puede concluir que la presencia de fibras dificulta el flujo libre del mortero. Nkomo *et. al.* [37] sugieren que esta disminución podría estar relacionada con la tendencia de las fibras a anclarse en la mezcla. Además, se destaca la necesidad de la adición de aditivos para contrarrestar este efecto y mejorar la trabajabilidad de la mezcla reforzada con fibras de PET. Los resultados obtenidos concuerdan con diversos estudios de mortero y concreto reforzado con fibras PET [38] [39] [40] [41].

Mohammed y Karim [42] sugieren que, aunque el ensayo de asentamiento es común y económico, puede no ser un indicador adecuado de la trabajabilidad en mezclas que contienen fibras. En su lugar, propone la realización del ensayo de consistencia Vebe, el cual evalúa la capacidad del concreto fibroso para fluir bajo vibración, midiendo el tiempo que el disco transparente tarda en entrar en

contacto completo con el concreto (tiempo Vebe), lo que podría proporcionar una evaluación más precisa de la trabajabilidad en este contexto.

5.3 Ensayo de flexión

La Tabla 5.4 presenta las resistencias a la flexión obtenidas a los 7 y 28 días de curado para cada probeta, incluyendo la resistencia promedio para cada mezcla. La Figura 5.1 ilustra la variación de la resistencia en cada espécimen. En el Anexo B se incluyen las cargas obtenidas para cada ensayo.

El mejor desempeño en flexión para ambas edades lo mostró MUPET, que contenía fibras PET sin tratamiento térmico. Aunque a los 7 días la mezcla de control exhibió una resistencia superior a las mezclas MTPET-1 y MTPET-2, a los 28 días ambas combinaciones superaron la resistencia de la mezcla de control. En este periodo, todas las mezclas que incorporaron fibras mostraron mejoras significativas, con aumentos en los valores que oscilaron entre el 10% y el 24%, aproximadamente, con respecto a la resistencia a flexión de la mezcla patrón.

Tabla 5.4: Resultados ensayo de flexión.

Espécimen	N° de probeta	7 días Flexión [MPa]	7 días Promedio [MPa]	Desviación estándar 7 días [MPa]	28 días Flexión [MPa]	28 días Promedio [MPa]	Desviación estándar 28 días [MPa]
MR00	1	6,69	6,35	0,29	7,44	8,44	0,90
	2	6,19			8,69		
	3	6,19			9,19		
MUPET	1	7,56	6,77	0,89	10,56	10,48	0,75
	2	6,94			9,69		
	3	5,81			11,19		
MTPET-1	1	6,06	6,19	0,33	9,56	10,31	0,66
	2	6,56			10,56		
	3	5,94			10,81		
MTPET-2	1	6,69	6,27	0,32	9,44	9,73	0,40
	2	6,19			9,56		
	3	5,94			10,19		
MTPET-3	1	6,44	6,65	0,71	8,94	9,27	0,31
	2	7,44			9,31		
	3	6,06			9,56		

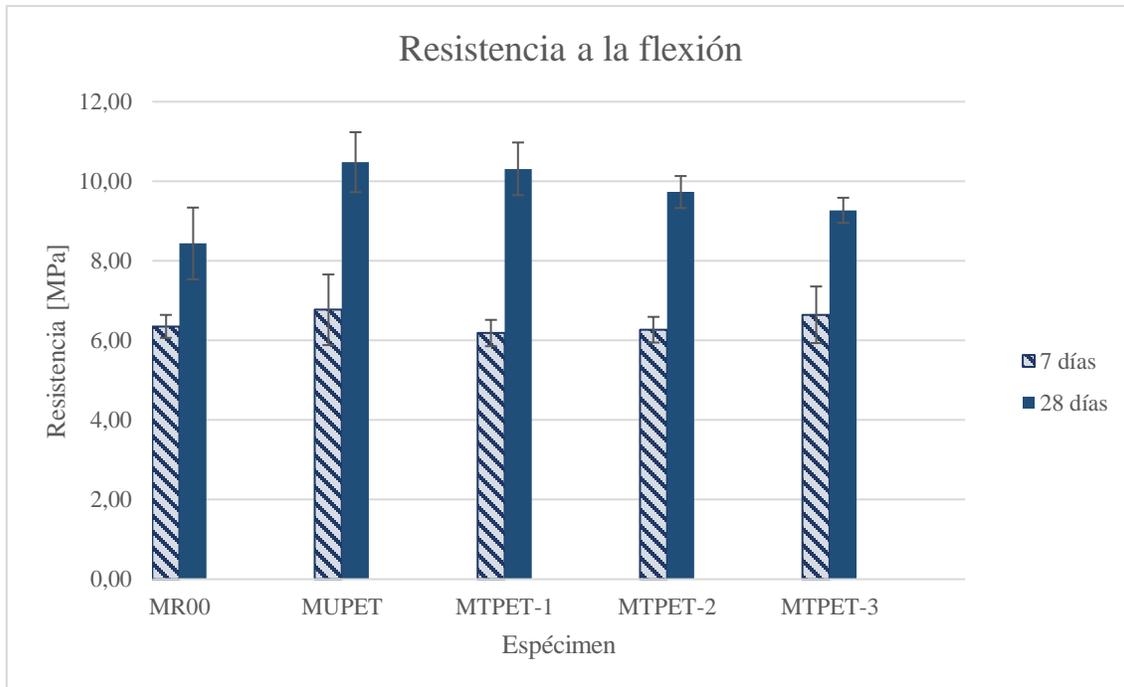


Figura 5.1: Resistencia a la flexión para cada espécimen.

Los resultados obtenidos al incorporar fibra coinciden con los hallazgos de la literatura, que resalta el impacto positivo de las fibras en la contención de grietas y la prevención de su propagación [14], [32]. Aunque MUPET presenta los resultados más destacados, MTPET-1, MTPET-2 y MTPET-3 presentan valores cercanos, con reducciones del 1,32%, 7,13% y 11,54%, respectivamente, en comparación con la mezcla con fibras sin tratamiento. Esta disminución podría atribuirse al aumento de poros y, por ende, al incremento de espacios vacíos en la matriz, resultado de la curvatura producida en las fibras por los tratamientos térmicos, como se observó en la sección 4.4. Además, el tratamiento térmico podría haber suavizado la superficie, eliminando las microgrietas que facilitaban el anclaje de la fibra en la mezcla.

En cuanto al comportamiento de falla, el mortero patrón exhibió una falla frágil, donde la probeta se agrietó y falló separándose en dos. En contraste, las probetas con fibras, al experimentar la falla, mostraron grietas sin producirse la ruptura total, manteniendo ambas partes unidas gracias al entrelazado de las fibras. Este comportamiento permitió que las probetas soportaran carga adicional después de la falla, lo cual podría ser beneficioso en situaciones sísmicas o de terremotos. Esto sugiere que la adición de fibra PET mejora la ductilidad del mortero, en concordancia con lo mencionado en otros estudios [14], [39], [43].

5.4 Ensayo de compresión

Los resultados de los ensayos de compresión de las muestras de mortero a los 7 y 28 días de curado para las diversas mezclas se detallan en las Tabla 5.5 y se presentan visualmente en el Figura 5.2. La

resistencia a la compresión de las muestras se determinó calculando el promedio de los resultados de las dos mitades de las muestras sometidas a flexión para cada período de curado, y luego calculando el promedio de los tres valores obtenidos, como se ilustra en el Anexo C.

Según los resultados obtenidos, se evidencia que la incorporación de fibras de PET conduce a un incremento en la resistencia a la compresión en la mayoría de los casos, siendo la mezcla con fibras de PET sin tratamiento térmico la que exhibe la resistencia más destacada en ambas edades de curado.

A los 7 días, todos los especímenes presentaron resultados superiores al mortero patrón, con aumentos del 9,91%, 12,2%, 19,55% y 29,7% para MTPET-2, MTPET-1, MTPET-3 y MUPET, respectivamente.

Al alcanzar los 28 días, la variación porcentual de la resistencia respecto al mortero patrón se redujo, y la mezcla con fibra PET tratada con agua caliente, MTPET-1, mostró un valor de resistencia a la compresión un 8,24% menor que el mortero de referencia. Las otras muestras, MTPET-2, MTPET-3 y MUPET, experimentaron aumentos del 3,98%, 5,49% y 7,87%, respectivamente, en comparación con el mortero patrón.

Tabla 5.5: Resultados ensayos de compresión.

Espécimen	N° de probeta	7 días Promedio probeta [MPa]	7 días Promedio mezcla [MPa]	Desv. estándar 7 días [MPa]	28 días Promedio probeta [MPa]	28 días Promedio mezcla [MPa]	Desv. estándar 28 días [MPa]
MR00	1	14,18	14,44	0,35	27,31	26,45	0,97
	2	14,84			25,39		
	3	14,30			26,65		
MUPET	1	19,02	18,74	0,52	28,33	28,53	1,33
	2	19,06			29,95		
	3	18,14			27,32		
MTPET-1	1	16,84	16,20	0,72	23,62	24,27	0,86
	2	16,35			23,95		
	3	15,41			25,25		
MTPET-2	1	15,64	15,87	0,20	27,05	27,50	0,53
	2	15,95			27,37		
	3	16,02			28,09		
MTPET-3	1	17,83	17,26	0,49	28,40	27,90	0,72
	2	16,99			27,08		
	3	16,97			28,23		

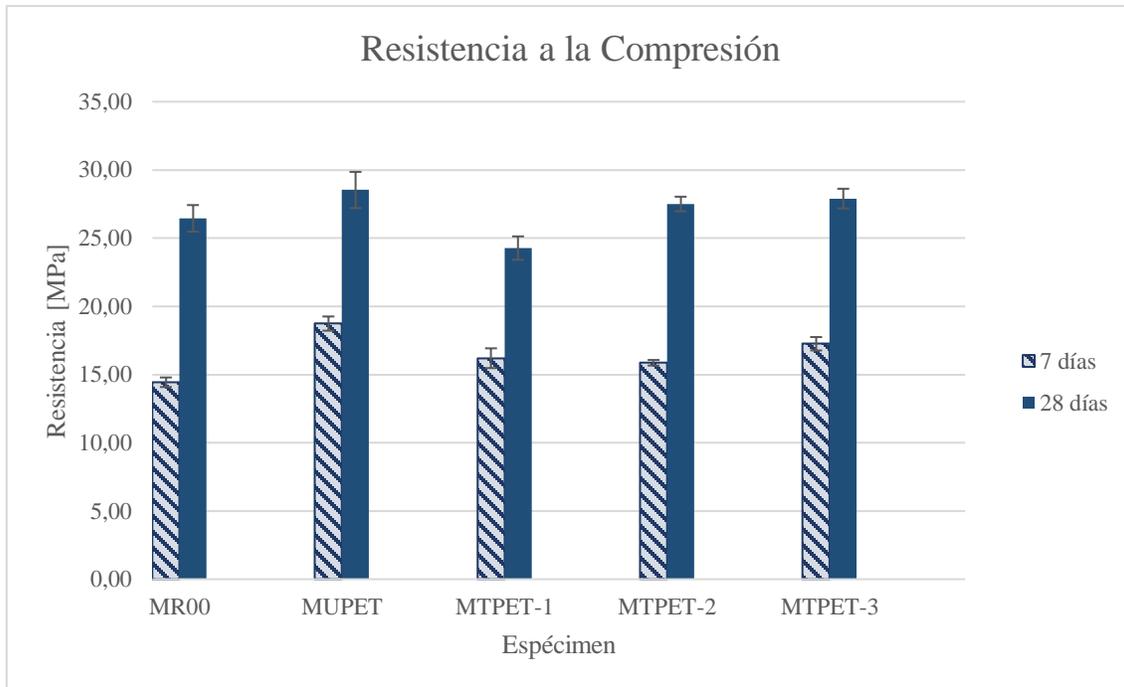


Figura 5.2: Resistencia a la compresión para cada espécimen.

La disminución observada en MTPET-1 podría atribuirse a la distribución aleatoria de las fibras, generando puntos más débiles que afectan la resistencia a la compresión, como se menciona en [44]. Esta situación, combinada con la tendencia de la fibra a enrollarse durante el tratamiento con agua caliente, podría haber resultado en un aumento de las cavidades internas. Según Pujadas *et al.* [45], la orientación de la fibra depende principalmente de la relación de aspecto, la dirección del flujo de la pasta y la posición de la fibra en relación con el molde.

Otro factor que puede estar contribuyendo a la disminución de la resistencia es el comportamiento de anclaje de las fibras. Las fibras que establecen un vínculo efectivo con el mortero y presentan una mayor resistencia al deslizamiento tienden a mejorar la resistencia, mientras que las fibras con mayor área no unida podrían mostrar una disminución en la resistencia [32].

Aunque las fibras utilizadas en MTPET-3 también presentan la curvatura debido al tratamiento con agua caliente, los resultados no muestran la misma tendencia que se observa en MTPET-1. Esta diferencia podría atribuirse a la mejora en la mojabilidad de la superficie del PET, como se menciona en [34], resultado del tratamiento de radiación, lo que posiblemente haya reducido la presencia de poros al lograr una mejor adherencia a la mezcla. Además, si observamos las muestras ensayadas que obtuvieron el menor valor para MTPET-1 (22,40 MPa) y MTPET-3 (26,42 MPa) en la Figura 5.3a y Figura 5.3b, respectivamente, se observa una mayor porosidad en la muestra MTPET-1. Se presume que esta porosidad es debido a que le faltó tiempo de compactación en la mesa de vibrado. Como se mencionó en la sección 4.6, se utilizó un tiempo de vibrado común para todas las muestras, de manera de tener igualdad de condiciones, sin embargo, esto no es lo más recomendable para mezclas con baja

trabajabilidad. Por lo tanto, la porosidad observada podría atribuirse a la insuficiencia de tiempo de compactado necesario para liberar las burbujas internas de la mezcla.

Cabe destacar que, a pesar de esta porosidad, la resistencia a la flexión no se vio afectada, ya que las fibras desempeñaron un papel importante al mantener unidas las partes, evitando su separación.

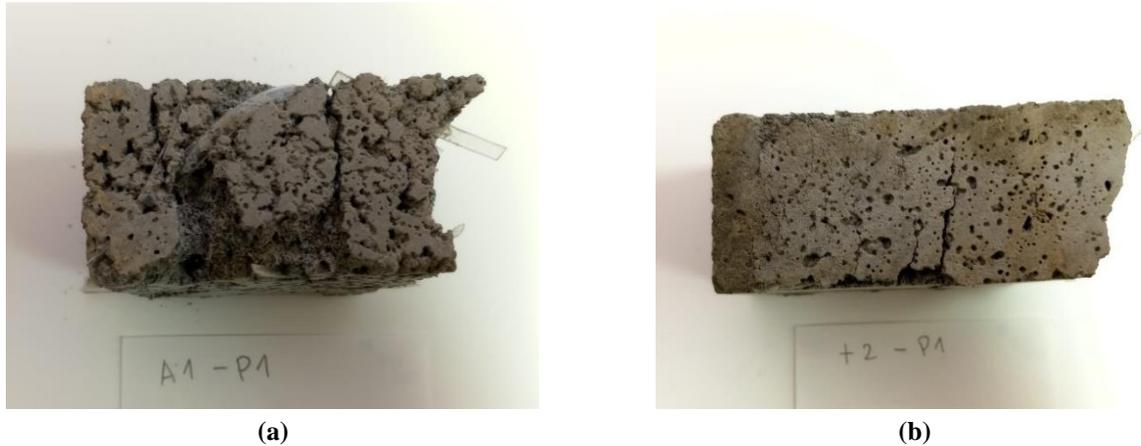


Figura 5.3: Muestras ensayadas de (a) MTPET-1, y (b) MTPET-3.

5.5 Fisuración

En las Figura 5.4a y Figura 5.4b se muestran los patrones de falla característicos del mortero de control y del mortero con agregado de fibra PET, respectivamente, durante la prueba de resistencia a la flexión.

Como se detalló anteriormente, el mortero sin fibra mostró una falla frágil con un colapso rápido y separación total de las partes después de la formación de la grieta. En cambio, todas las muestras de mortero con fibras lograron resistir niveles de desplazamiento más elevados tras la formación de la grieta.

Este comportamiento puede atribuirse a la combinación de un anclaje efectivo de las fibras en la mezcla y a la flexibilidad de las partículas de PET, creando así un bloqueo entre las superficies fracturadas. Este fenómeno evita la falla completa de la probeta al impedir el crecimiento de la grieta, lo cual concuerda con investigaciones previas revisadas [39], [43].

Debido a que la probeta debía dividirse en dos partes para llevar a cabo los ensayos de compresión, se requirió aplicar fuerza para separar las partes. En Figura 5.5 se muestra la probeta después de la aplicación de cargas adicionales para lograr su fractura completa. A pesar de la fractura, las partes permanecen unidas por las fibras, confirmando la buena adherencia que estas tienen con la mezcla.



(a) (b)
Figura 5.4: Patrones de falla para (a) mortero patrón; y (b) mortero con agregado de fibra PET.



Figura 5.5: Separación de las partes de probeta con agregado de fibra PET.

En los ensayos también se pudo observar que la distribución aleatoria de las fibras influye en la forma en que la probeta falla. La Figura 5.6 muestra una fibra de plástico que estaba posicionada en la dirección transversal de la probeta, cerca de una de las caras. Este posicionamiento generó una sección débil, dando como resultado una grieta que sigue la forma de la fibra.



Figura 5.6: Forma de falla de una probeta.

CAPÍTULO 5: Análisis de costos y viabilidad

En este capítulo, se examinan los principales costos que influyen en cada uno de los especímenes estudiados, teniendo en cuenta las proporciones por metro cuadrado de mezcla. Además, se evalúa la viabilidad de implementación considerando las normativas vigentes.

6.1 Costos

Las empresas líderes en la industria del cemento en Chile incluyen a Melón S.A., Cemento Polpaico S.A. y Cementos Biobío S.A. Al llevar a cabo un análisis de precios en diversas ferreterías a nivel nacional, se constató que el costo promedio de un saco de 25 kg de cemento especial o de uso general es de \$3.838 para ventas minoristas. La Tabla 6.1 detalla las variaciones de precios identificadas en el mercado durante la revisión para las compañías mencionadas.

Tabla 6.1: Precios de referencia de las principales empresas de cemento del país.

Empresa	Precios del mercado
Cementos Biobío S.A.	\$3.230 - \$4.000
Melón S.A.	\$3.230 - \$4.990
Cementos Polpaico S.A.	\$3.230 - \$4380

En relación con la arena fina, se notó una variación de precios que iba desde \$990 hasta \$1.570 por saco de 25 kg, con un precio promedio en el mercado de \$1.224. En cuanto al costo del agua potable, se tomó en consideración el precio de \$1,4 por litro de la empresa Essbio.

En el caso del precio de la fibra de plástico PET, la situación se complica debido a la ausencia de un mercado establecido que ofrezca la fibra ya elaborada. Obtener una referencia de su valor implica considerar el precio de las botellas plásticas, el cual no está estandarizado en Chile, generando variabilidad en los costos.

Según datos de Emprendo Verde [46], el precio por kilo de botellas plásticas PET recicladas en el mercado chileno es de \$200, llegando a \$500 si el kilo solo incluye la botella sin tapas y etiquetas. Para tener una referencia de precios en países con tarifas establecidas para el PET, en Ecuador, el Servicio de Rentas Internas (SRI) estableció que el precio de 23 botellas de plástico PET recicladas, equivalentes a un kilogramo, es de USD\$0,46, aproximadamente \$416 en pesos chilenos [47]. En este caso, se utilizará un valor intermedio de \$350 por kilogramo de botellas PET recicladas. Es importante mencionar que este costo se podría reducir si se estableciera un acuerdo con alguna empresa de reciclaje o entidades que donen sus botellas plásticas, como restaurantes o bares.

Además de estos costos, se debe considerar el valor de la fabricación de la fibra. Sin embargo, dada la dificultad para establecer un precio para una máquina industrial capaz de cortar la fibra, no se

tomarán en cuenta estos valores, ya que corresponderán a un costo fijo que afectará a todas las mezclas por igual.

Lo que es crucial tener en cuenta es el costo del tratamiento térmico aplicado a la fibra, ya que este factor afectará de manera significativa los valores de cada mezcla, haciendo que se diferencien. En este caso se consideró que el costo de kWh en Concepción es de \$142 y que el microondas utilizado es de una potencia de 1280 W y para el tratamiento de agua caliente se consideró un quemador mediano tiene un consumo de $0,15 \text{ m}^3/\text{h}$ [48] y que el precio del gas por metro cúbico es de \$4.349 [49]. De esta manera, los costos asociados a la elaboración de un metro cúbico de cada muestra se presentan en la Tabla 6.2. El cálculo de los costos a detalle se presenta en el Anexo D.

Tabla 6.2: Costos asociados para la fabricación un metro cúbico de cada espécimen con respecto al patrón.

Espécimen	MR00	MUPET	MTPET-1	MTPET-2	MTPET-3
Total	\$147.204	\$152.979	\$207.260	\$155.479	\$209.760
Diferencia c/r al patrón	0,00%	3,92%	40,80%	5,62%	42,50%

Es importante destacar que en estos costos no se han incluido los gastos asociados al transporte de materiales, la mano de obra y el costo relacionado al mantenimiento de la maquinaria.

Al observar los valores se puede ver que la adición de fibra de plástico reciclado a la mezcla representa a un aumento de aproximadamente un 4% a 43% por metro cúbico. A gran escala, estos incrementos no parecen ser opciones atractivas para el mercado.

6.2 Viabilidad de implementación

El mortero desempeña diversas funciones esenciales en la construcción, ya que se utiliza como mortero de junta para unir ladrillos, mortero de relleno para colmar espacios, y mortero de revestimiento continuo o estuco para mejorar la apariencia final de las estructuras. Para cada una de estas aplicaciones, la Norma Chilena establece criterios de resistencia mínima que deben cumplir los morteros para ser considerados aptos.

En el caso del mortero de junta destinado a la albañilería armada, que incorpora refuerzos de barras de acero, se establece un valor mínimo de resistencia a la compresión de 10 MPa [50]. Para las albañilerías confinadas, que se encuentran enmarcadas por pilares y cadenas de hormigón, la resistencia mínima a la compresión del mortero es de 5 MPa cuando se utiliza albañilería con ladrillos cerámicos artesanales, y de 10 MPa cuando se emplean unidades fabricadas a máquina [51]. En el caso de mortero de revestimiento o estucos, el Comité Morteros y Hormigones recomienda exigir una resistencia mínima de 2,5 MPa para estucos exteriores y de 1,0 MPa para estucos interiores [15].

Al comparar los requisitos mínimos de resistencia mecánica con los resultados obtenidos en las muestras ensayadas, se observa que todas cumplen con los estándares necesarios. Esto sugiere que la aplicación de fibra reciclada de botellas PET en la fabricación de mortero para construcción es posible, siempre y cuando se satisfagan otros requisitos del proyecto, como durabilidad, consistencia y adherencia.

Considerando los resultados de los ensayos mecánicos y los costos asociados, la opción más recomendable para implementar el uso de esta fibra en mortero de construcción sería el mortero con fibra sin tratamiento. Sin embargo, dado que esto implica un desembolso adicional, podría ser necesario implementar algún tipo de subsidio por parte del gobierno para incentivar el reciclaje de estos desechos y hacer que su uso sea más viable desde el punto de vista económico.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Se analizó el impacto de la adición de fibras de PET tratadas térmicamente en el mortero con el objetivo de caracterizar el comportamiento mecánico de este material. Para esto se confeccionaron probetas de mortero a las cuales se le adicionó 0,75% de fibras en peso. Estas fibras fueron sin tratamiento y con tratamientos térmicos de agua caliente, microondas y la combinación de ambos.

Los resultados de la caracterización mecánica de las fibras de PET mostraron que los tratamientos térmicos aumentaron notablemente la resistencia a la tracción de las fibras, siendo el tratamiento térmico de microondas el más efectivo, logrando una mejora del 51% en comparación con las fibras sin tratamiento. En cuanto a la trabajabilidad de las mezclas, se observó una reducción en el asentamiento debido a la presencia de las fibras, lo que sugiere la necesidad de aditivos para mejorar la manipulación de las mezclas reforzadas o la utilización de equipos mecánicos de alta potencia.

En ambos ensayos, tanto en flexión como en compresión, la mezcla MUPET mostró las mejores resistencias en todas las edades de ensayo. En los ensayos de flexión, la inclusión de fibras demostró mejoras significativas en la resistencia, superando a la mezcla de control en todas las combinaciones con mejoras del 10% al 24%. Estas mejoras proporcionaron un comportamiento más dúctil, mejoraron la capacidad de contención de grietas y la absorción de carga después de la falla.

Por otro lado, en los ensayos de compresión, se observó un aumento general en la resistencia, sin embargo, se observó una disminución en el MTPET-1. Esta reducción podría atribuirse a la distribución aleatoria de las fibras y al enrollamiento de la fibra durante el tratamiento térmico, posiblemente resultando en un aumento de cavidades internas. Además, se evidenció una mayor porosidad en la probeta en comparación con las otras mezclas, lo que sugiere una posible falta de tiempo de compactación.

Los resultados de los ensayos indican que el mortero con fibra cumple con los requisitos mecánicos de varias aplicaciones de la construcción. Sin embargo, al considerar los costos, se observa que la adición de fibra de plástico reciclado aumenta el costo de la mezcla entre un 4% y 43% por metro cúbico, lo cual no resulta económicamente atractivo a gran escala. Por lo que sería necesario implementar un subsidio gubernamental para fomentar el reciclaje de estos desechos en la construcción.

Debido a la escasez investigaciones sobre la influencia de tratamientos térmicos aplicados a fibras antes de su incorporación en mezclas de cemento, este estudio contribuye a ampliar la comprensión del efecto de dichos tratamientos en plásticos incorporados en morteros. Los resultados respaldan la hipótesis planteada al demostrar que la inclusión de fibras de PET tratadas térmicamente mejora las propiedades mecánicas del mortero, aunque no supera a las mezclas con fibras PET sin tratamiento.

Para futuras investigaciones, se sugiere realizar un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) en las fibras dentro del mortero para comparar los efectos de los tratamientos en las superficies. Además, se recomienda llevar a cabo los mismos ensayos y tratamientos, pero incorporando la fibra como parte del reemplazo del árido fino.

Referencias

- [1] Z. H. Lee, S. C. Paul, S. Y. Kong, S. Susilawati, y X. Yang, «Modification of Waste Aggregate PET for Improving the Concrete Properties», *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2019, pp. 1-10, dic. 2019, doi: 10.1155/2019/6942052.
- [2] R. Sharma y P. P. Bansal, «Use of different forms of waste plastic in concrete – a review», *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 473-482, ene. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.042.
- [3] IETC, «Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability», International Environmental Technology Centre. Accedido: 30 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.unep.org/ietc/resources/publication/single-use-plastics-roadmap-sustainability>
- [4] M. K. Askar, Y. S. S. Al-Kamaki, y A. Hassan, «Utilizing Polyethylene Terephthalate PET in Concrete: A Review», *Polymers*, vol. 15, n.º 15, Art. n.º 15, ene. 2023, doi: 10.3390/polym15153320.
- [5] S. Revathi, P. Sathis kumar, D. Suresh, y S. Thowfick Anwar, «Behaviour of concrete with PET bottles as fibers & silica fume as partial replacement of cement», *Mater. Today Proc.*, abr. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.580.
- [6] A. H. Alani, N. M. Bunnori, A. T. Noaman, y T. A. Majid, «Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC)», *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 395-405, jun. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.088.
- [7] N. Halim, N. Taib, y Z. Abdul Aziz, «The performance of thermal property in concrete containing waste pet (polyethylene terephthalate) as an alternative sustainable building material», *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 452, pp. 1-7, may 2020, doi: 10.1088/1755-1315/452/1/012108.
- [8] G. Bamigboye, K. Tarverdi, D. Adigun, B. Daniel, U. Okorie, y J. Adediran, «An appraisal of the mechanical, microstructural, and thermal characteristics of concrete containing waste PET as coarse aggregate», *Clean. Waste Syst.*, vol. 1, pp. 1-11, mar. 2022, doi: 10.1016/j.clwas.2022.100001.
- [9] M. Batayneh, I. Marie, y I. Asi, «Use of selected waste materials in concrete mixes», *Waste Manag.*, vol. 27, n.º 12, pp. 1870-1876, ene. 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.07.026.
- [10] A. M. Azhdarpour, M. R. Nikoudel, y M. Taheri, «The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation», *Constr. Build. Mater.*, vol. 109, pp. 55-62, abr. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056.
- [11] M. Rahman, M. Mahi, y T. Chowdhury, «Utilization of waste PET bottles as aggregate in masonry mortar», *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, nov. 2013.
- [12] K. Hannawi, S. Kamali-Bernard, y W. Prince, «Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates», *Waste Manag.*, vol. 30, n.º 11, pp. 2312-2320, nov. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.028.
- [13] C. Marthong y D. K. Sarma, «Influence of PET fiber geometry on the mechanical properties of concrete: an experimental investigation», *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 20, n.º 7, pp. 771-784, ago. 2016, doi: 10.1080/19648189.2015.1072112.
- [14] H. Smaoui, A. Trabelsi, Z. Kammoun, y B. Aouicha, «Mechanical, physical, blast waves and ballistic impact resistance properties of a concrete incorporating thermally treated PET inclusions», *Constr. Build. Mater.*, vol. 365, pp. 1-15, feb. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130088.
- [15] Norma Chilena Oficial, *NCh2256/1: Morteros - Parte 1: Requisitos generales*. 2001.
- [16] Norma Chilena Oficial, *NCh148.Of68: Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales*.

- [17] L. Gutiérrez de López, *El concreto y otros materiales para la construcción*. Sede Manizales, 2003. Accedido: 9 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/9302>
- [18] Norma Chilena Oficial, *NCh163.Of2013: Áridos para morteros y hormigones - Requisitos*.
- [19] F. V. Carreño Cornejo, «Análisis técnico-económico del uso de Pet reciclado como reemplazo parcial de áridos finos en hormigones», 2020, Accedido: 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177847>
- [20] Norma Chilena Oficial, *NCh1498-2012: Hormigón y mortero - Agua de amasado - Clasificación y requisitos*.
- [21] Norma Chilena Oficial, *NCh170: Hormigón - Requisitos generales*.
- [22] Norma Chilena Oficial, *NCh2261-2010: Morteros - Confección de probetas en obra y determinación de la resistencia a compresión*.
- [23] Norma Chilena Oficial, *NCh158.Of67: Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento*.
- [24] Norma Chilena Oficial, *NCh171.EOf75: Hormigón - Requisitos generales*.
- [25] Norma Chilena Oficial, *NCh1019.Of2009: Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams*.
- [26] Norma Chilena Oficial, *NCh2257/3.Of96: Morteros - Determinación de la consistencia - Parte 3: Método del asentamiento del cono*.
- [27] Norma Chilena Oficial, *NCh1038-2009: Hormigón - Ensayo de tracción por flexión*.
- [28] S. Spadea, I. Farina, A. Carrafiello, y F. Fraternali, «Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement», *Constr. Build. Mater.*, vol. 80, pp. 200-209, abr. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075.
- [29] Maryam. H. Naser, F. H. Naser, y M. K. Dhahir, «Tensile behavior of fiber reinforced cement mortar using wastes of electrical connections wires and galvanized binding wires», *Constr. Build. Mater.*, vol. 264, pp. 1-9, dic. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120244.
- [30] N. Ranjan, S. Banerjee, S. Nayak, y S. Das, «Waste polyethylene terephthalate (PET) fiber reinforced mortar in enhancing the bond behavior of masonry», *Structures*, vol. 53, pp. 908-923, jul. 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.04.097.
- [31] T. Zerig, A. Aidoud, M. Belachia, T. Djedid, y M. Abbas, «Combined sand eco-mortar reinforced with polyethylene Terephthalate: Behavior and optimization using RSM method», *Constr. Build. Mater.*, vol. 404, p. 133160, nov. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133160.
- [32] S. Orasutthikul, D. Unno, y H. Yokota, «Effectiveness of recycled nylon fiber from waste fishing net with respect to fiber reinforced mortar», *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 594-602, ago. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.134.
- [33] J.-H. J. Kim, C.-G. Park, S.-W. Lee, S.-W. Lee, y J.-P. Won, «Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites», *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, n.º 3, pp. 442-450, abr. 2008, doi: 10.1016/j.compositesb.2007.05.001.
- [34] M. Abu-Saleem, Y. Zhuge, R. Hassanli, M. Ellis, M. M. Rahman, y P. Levett, «Microwave radiation treatment to improve the strength of recycled plastic aggregate concrete», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, pp. 1-14, dic. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00728.
- [35] ASTM, *D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. Accedido: 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.astm.org/d0638-14.html>
- [36] Controls, «Sistemas de ensayo para determinar las propiedades mecánicas del hormigón». [En línea]. Disponible en: <https://geomecanicalatina.com/productos/controls-group/controls-group-50-SISTEMAS-DE-ENSAYOS-PARA-DETERMINAR-LAS-PROPIEDADES-MECANICAS-DEL-HORMIGON.pdf>

- [37] N. Z. Nkomo, L. M. Masu, y P. K. Nziu, «Effects of Polyethylene Terephthalate Fibre Reinforcement on Mechanical Properties of Concrete», *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2022, p. e4899298, may 2022, doi: 10.1155/2022/4899298.
- [38] Q. Peng, B. Chen, Q. Lu, K. Li, y W. Jin, «Effect of steel-waste PET hybrid fiber on properties of recycled aggregate concrete based on response surface methodology», *Constr. Build. Mater.*, vol. 397, p. 132448, sep. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132448.
- [39] E. Rahmani, M. Dehestani, M. H. A. Beygi, H. Allahyari, y I. M. Nikbin, «On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles», *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1302-1308, oct. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
- [40] A. Olalere y J. Ige, «Effect of Waste (PET) Bottle Fibers on the Properties of Concrete», sep. 2018.
- [41] A. Kumar y S. Kumar, *EFFECT OF GEOMETRY OF RECYCLED PET FIBER ON THE PROPERTIES OF CONCRETE FOR RIGID PAVEMENT*. 2019. doi: 10.24327/ijrsr.2018.0903.1775.
- [42] A. A. Mohammed y S. H. Karim, «Impact strength and mechanical properties of high strength concrete containing PET waste fiber», *J. Build. Eng.*, vol. 68, p. 106195, jun. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.106195.
- [43] B. S. Al-Tulaian, M. J. Al-Shannag, y A. R. Al-Hozaimy, «Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar», *Constr. Build. Mater.*, vol. 127, pp. 102-110, nov. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131.
- [44] C. S. Das, T. Dey, R. Dandapat, B. B. Mukharjee, y J. Kumar, «Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 649-659, nov. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.036.
- [45] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalaro, A. de la Fuente, y A. Aguado, «Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels», *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 496-503, ago. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.067.
- [46] EmprendoVerde, «Emprendimiento chileno Kyklos busca darle un giro al reciclaje • Emprendo Verde». Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.emprendoverde.cl/emprendimiento-chileno-kyklos-busca-darle-un-giro-al-reciclaje/>
- [47] Primicias, «SRI fija precio para el reciclaje de botellas de plástico». Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/botellas-plastico-sri-precio-reciclaje/>
- [48] ENARGAS, «El consumo de gas de los artefactos». Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://enargas.page.link/consumo-artefactos>
- [49] Abastible S.A., «Precio Lista Gas licuado». Accedido: 15 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://abastible.cl/wp-content/uploads/2024/01/Excel-Editable-Precios-de-Abastible.cl-11-de-Enero-2024-al-17-de-Enero-2024-FORMATO-NUEVO.pdf>
- [50] Norma Chilena Oficial, *NCh1928.Of1993: Albañilería armada - Requisitos para el diseño y cálculo*.
- [51] Norma Chilena Oficial, *NCh2123.Of1997: Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo*.

Anexo A: Resultados ensayos de tracción

En la Tabla A.1 se muestran los resultados obtenidos de cada ensayo de tracción realizadas a las fibras de PET.

Tabla A.1: Resultados ensayos de tracción.

N° de probeta	UPET	TPET-1	TPET-2	TPET-3
1	51,9	107	65,1	104
2	87,9	119	124	79,5
3	82,0	94,7	93,9	127
4	99,9	135	110	87,3
5	114	114	124	58,2
6	41	122	94,6	108
7	28,8	104	129	101
8	32,7	97,8	98,2	108
9	111	105	131	77,2
10	48,8	89,3	139	104
11	101	116	130	70,3
12	55,3	126	125	100
13	109	98,2	160	141
14	73,6	117	157	87,5
15	96,4	128	101	91,5
16	97,6	98,7	108	110
17	88,1	98,0	113	115
18	84,5	109	114	91,5
19	98,1	96,6	152	102
20	87,5	103	137	92,6

Anexo B: Resultados ensayos de flexión

En la Tabla A.2 se presentan los resultados de los ensayos de flexión realizados a las probetas.

Tabla A.2: Resultados ensayos de flexión para cada probeta.

Edad	Espécimen	N° de Probeta	Flexión (despl)	Carga [Kgf]	Flexión [Kgf/cm2]	Flexión [MPa]	Flexión Prom [Mpa]	
7 días	MR00	1	49	181,85	68,2	6,69	6,35	
		2	45	168,25	63,1	6,19		
		3	45	168,25	63,1	6,19		
	MUPET	1	56	205,65	77,1	7,56	6,77	
		2	51	188,65	70,7	6,94		
		3	42	158,05	59,3	5,81		
	MTPET-1	1	44	164,85	61,8	6,06	6,19	
		2	48	178,45	66,9	6,56		
		3	43	161,45	60,5	5,94		
	MTPET-2	1	49	181,85	68,2	6,69	6,27	
		2	45	168,25	63,1	6,19		
		3	43	161,45	60,5	5,94		
	MTPET-3	1	47	175,05	65,6	6,44	6,65	
		2	55	202,25	75,8	7,44		
		3	44	164,85	61,8	6,06		
	28 días	MR00	P1	55	202,25	75,8	7,44	8,44
			P2	65	236,25	88,6	8,69	
			P3	69	249,85	93,7	9,19	
MUPET		P1	80	287,25	107,7	10,56	10,48	
		P2	73	263,45	98,8	9,69		
		P3	85	304,25	114,1	11,19		
MTPET-1		P1	72	260,05	97,5	9,56	10,31	
		P2	80	287,25	107,7	10,56		
		P3	82	294,05	110,3	10,81		
MTPET-2		P1	71	256,65	96,2	9,44	9,73	
		P2	72	260,05	97,5	9,56		
		P3	77	277,05	103,9	10,19		
MTPET-3		P1	67	243,05	91,1	8,94	9,27	
		P2	70	253,25	95,0	9,31		
		P3	72	260,05	97,5	9,56		

Anexo C: Resultados ensayos de compresión

En la Tabla A.3 se presentan los resultados de los ensayos de compresión realizados a las probetas.

Tabla A.3: Resultados ensayos de compresión para cada probeta.

Edad	Espécimen	N° de Probeta	P1 [MPa]	P2 [MPa]	Prom probeta [MPa]	Prom mezcla [Mpa]
7 días	MR00	1	14,54	13,81	14,18	14,44
		2	14,74	14,93	14,84	
		3	13,81	14,79	14,30	
	MUPET	1	17,96	20,07	19,02	18,74
		2	19,51	18,61	19,06	
		3	18,53	17,74	18,14	
	MTPET-1	1	16,74	16,93	16,84	16,20
		2	17,11	15,59	16,35	
		3	15,52	15,30	15,41	
	MTPET-2	1	17,71	13,56	15,64	15,87
		2	16,44	15,45	15,95	
		3	16,58	15,46	16,02	
	MTPET-3	1	17,55	18,10	17,83	17,26
		2	18,15	15,82	16,99	
		3	16,39	17,54	16,97	
28 días	MR00	1	26,54	28,08	27,31	26,45
		2	25,46	25,32	25,39	
		3	27,05	26,24	26,65	
	MUPET	1	27,21	29,45	28,33	28,53
		2	30,19	29,70	29,95	
		3	27,22	27,41	27,32	
	MTPET-1	1	22,40	24,84	23,62	24,27
		2	24,56	23,33	23,95	
		3	24,61	25,88	25,25	
	MTPET-2	1	27,87	26,22	27,05	27,50
		2	28,48	26,26	27,37	
		3	25,03	31,15	28,09	
	MTPET-3	1	28,44	28,35	28,40	27,90
		2	26,42	27,73	27,08	
		3	28,49	27,97	28,23	

Anexo D: Costos

En la Tabla A.4 se presentan los precios de referencia para cada componente del mortero.

Tabla A.4: Precios de referencia de los componentes.

Componente	Formato	Unidad	\$	\$/unidad
Cemento	25	kg	\$3.838,00	\$153,52
Agua	1	L	\$1,40	\$1,40
Arena	25	kg	\$1.224,00	\$48,96
PET	1	kg	\$350,00	\$350,00

Dado que el peso promedio de mezcla por metro cúbico es de 2200 kg, se requerirán 16,5 kg de fibra PET, considerando el 0,75% del peso. La Tabla A.5 detalla las cantidades necesarias de cada componente en kilogramos para la fabricación de un metro cúbico de mezcla, tanto para el mortero estándar, MR-00, como para las mezclas con agregado de fibra PET, MR-0,75.

Tabla A.5: Cantidades necesarias para confeccionar un metro cúbico.

Componente	MR-00	MR-0,75
Cemento	488,89	488,89
Arena	1466,67	1466,67
Agua	244,44	244,44
Fibra	0,00	16,50
Total	2200,00	2216,50

A continuación, se presentan los valores y consumos que deben tenerse en cuenta al realizar el cálculo de los gastos asociados a cada tratamiento térmico:

- Consumo quemador mediano: 0,15 m³/h
- Precio del gas \$/m³: \$4.349
- Potencia microondas: 1280 W
- Precio kWh: \$142

➤ Tratamiento térmico de agua caliente

La Tabla A.6 y Tabla A.7 se detallan los gastos asociados al consumo de agua y gas, respectivamente, durante el tratamiento de agua caliente. Estos cálculos se realizaron tomando en cuenta el tiempo y

las cantidades del tratamiento aplicado, como se explica en la sección 204.4. Cabe señalar que no se tuvo en cuenta el gas consumido durante el periodo desde que se encendió el quemador hasta alcanzar la temperatura de 100°C del agua.

Tabla A.6: Consumo de agua.

	Agua [L]	PET [kg]	Precio
Agua por aplicación de referencia	1	0,05	\$1,40
Agua por m^3	330	16,5	\$462

Tabla A.7: Consumo de gas.

	Tiempo [min]	Tiempo [hrs]	Consumo por hora [m^3]	Precio
Gas por aplicación de referencia	15	0,25	0,0375	\$163,0875
Gas por m^3	4950	82,5	12,375	\$53.818,9

➤ **Tratamiento térmico de microondas**

La Tabla A.8 detalla los gastos asociados al consumo de electricidad durante el uso del microondas. En estos cálculos tomaron en cuenta el tiempo y las cantidades del tratamiento aplicado, mencionado en la sección 4.4.

Tabla A.8: Consumo de electricidad.

	PET [kg]	Tiempo [min]	Tiempo [hrs]	Precio
Electricidad por aplicación de referencia	0,1	5	0,0833	\$15
Electricidad por m^3	16,5	825	13,75	\$2.499,2

➤ **Tratamiento térmico combinado**

Para el tratamiento térmico que combinó el uso de agua caliente y microondas, se calculó el costo total como la suma de los valores correspondientes a cada tratamiento por metro cúbico, obteniéndose el valor de \$56.780,08.

Así, se realizaron los cálculos de los costos asociados a cada mezcla, los cuales se presentan en la Tabla A.9.

Tabla A.9: Costos asociados a cada mezcla.

Componente	MR-00	MUPET	MTPET-1	MTPET-2	MTPET-3
Arena (\$)	\$71.808	\$71.808	\$71.808	\$71.808	\$71.808
Agua (\$)	\$342	\$342	\$342	\$342	\$342
Cemento (\$)	\$75.054	\$75.054	\$75.054	\$75.054	\$75.054
Fibra (\$)	\$0	\$5.775	\$60.056	\$8.274	\$62.555
Total	\$147.204	\$152.979	\$207.260	\$155.479	\$209.760
Diferencia c/r al patrón	0,00%	3,92%	40,80%	5,62%	42,50%