

Estudio experimental de las propiedades mecánicas del mortero reforzado con fibras de PET tratadas térmicamente

Meylí Valin-Ferández¹, Paula Javiera Naipán-Castro¹, Luis Enrique Merino-Quilodrán², Carlos Andrés Medina Muñoz¹, Alexis Fidel Salas-Delgado¹, José Luis Valin-Rivera³

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: mvalin@udec.cl, pnaipan2018@udec.cl, cmedinam@udec.cl, alesalas@udec.cl

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: luis.merino@udec.cl

³ Escuela de Ingeniería Mecánica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. Email: jose.valin@pucv.cl

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar el comportamiento mecánico del mortero con adición de fibras de PET tratadas térmicamente. Se utilizaron botellas de PET recicladas cortadas a 35 mm de longitud, y ancho entre 2 a 3 mm. Las fibras se utilizaron sin tratamiento térmico, con tratamiento en agua caliente, microondas y una combinación de estos dos últimos. En los ensayos de flexión, la inclusión de fibras demostró mejoras significativas en la resistencia del 9% al 24% respecto al control, proporcionando un comportamiento más dúctil, una mayor capacidad de contención de grietas y absorción de carga después de la falla. Para los ensayos de compresión, se observó un aumento general en la resistencia, sin embargo, se presentó una disminución en la resistencia de las probetas con fibras de tratamiento de agua caliente.

Palabras clave: mortero, PET, tratamiento térmico, propiedades mecánicas.

Abstract

The aim of this work was to characterize the mechanical behavior of mortar with the addition of heat-treated PET fibers. Recycled PET bottles cut to 35 mm in length and 2 to 3 mm in width were used. The fibers were used without heat treatment, with hot water treatment, microwave treatment, and a combination of the latter two. In the flexural tests, the inclusion of fibers demonstrated significant improvements in strength from 9% to 24% compared to the control, providing more ductile behavior, greater crack containment capacity, and load absorption after failure. For the compression tests, a general increase in strength was observed, however, a decrease in the strength of the specimens with hot water treated fibers was presented.

Keywords: mortar, PET, heat treatment, mechanical properties.

1. Introducción

En la actualidad muchos son los trabajos que se desarrollan procurando mejorar las propiedades de los materiales utilizados en la industria de la construcción. Esto ha promovido un amplio uso de agregados en las mezclas donde se utilizan desde materiales orgánicos que son derivados de plantas, hasta residuos industriales como lo son las gomas, los alambres, plásticos, etc.

Un material utilizado es la fibra de nailon reciclado según plantea Spadea et al. [1] quien lo utiliza variando longitud y porcentaje en peso en morteros de cemento. De su estudio concluye que a mayores longitudes y cantidades mejora el comportamiento a flexión, aunque la resistencia a la compresión se ve afectada en un 37%. No obstante, se destaca un aporte

en la resistencia a la tracción y mejoras en las propiedades de fractura.

Fibra de metal, como el acero galvanizado y el cobre también han sido utilizados en mortero de cemento para mejorar su resistencia, cómo lo expresa Naser et al. [2] en su trabajo. El aporte de estas fibras al mortero fue una mejora de la resistencia a la compresión entre el 11% y el 24%, donde el mejor resultado se obtuvo para la fibra de cobre al 1.5% de proporción en peso. De igual forma se encontró una mejora en la resistencia a la flexión la que aumentó un 118% en combinaciones híbridas de un 30% de fibra de cobre y un 70% de acero para un 1.5% de fracción de volumen. Así mismo se presentó un aumento de la resistencia a la tracción entre un 21% y un 173% donde la fibra más efectiva fue la del acero galvanizado.

Otro material muy valorizado es el PET, el que posee amplia disposición como residuo a nivel mundial y el que ha sido utilizado por diversos autores quienes han encontrado sus beneficios en la industria de la construcción. Ranjan et al. [3] utilizó fibras de PET reciclado en mortero obteniendo una mejora en la resistencia a la flexión para todas las muestras con este refuerzo. Zerig et al. [4] utilizó combinaciones de PET con longitudes de 20 mm y 30 mm, en cantidades de 0.5%, 1%, 1.5% y 2% en peso como agregado en mortero, obteniendo mejoras de la resistencia a la flexión donde la mejor combinación fue la fibra de 30 mm de longitud con proporción de 0.5% quien presentó un valor de 8 MPa lo que representó un incremento del 17% respecto al patrón. Orasutthikul et al. [5] utilizó fibras de 30 mm y 40 mm de longitud en proporciones 1% y 1.5% en peso en mortero, obteniendo mejoras en la resistencia a la flexión donde el mejor resultado se obtuvo para la combinación de una fibra de 40 mm de longitud en proporción de 1.5%, cuyo valor de 5.9 MPa presentó un incremento de 22.9% respecto al patrón. Mientras que Ranjan et al. [3] utilizó fibras de 18 mm y 35 mm de longitud en proporciones de 0.10%, 0.25%, 0.5%, 0.75% y 1%, donde para casi todas las combinaciones hubo mejora en la resistencia a la flexión, siendo el de mejor resultados el caso de la fibra de 35 mm con una proporción de 0.75% en peso con una resistencia de 3.23 MPa, lo que representa un incremento del 21.4% respecto al patrón.

Otros trabajos han abordado la influencia de la geometría del PET en las mezclas de mortero y hormigón, ya que un desafío al incorporar este es su unión con la matriz. Kim et al [6], por ejemplo, utilizó tres geometrías de fibra de PET reciclado donde una fibra estampada presentó una resistencia mecánica de unión mayor durante las pruebas de adherencia, lo que se atribuye a un aumento de la energía superficial de la fibra producto del aumento de la fricción entre la fibra y la matriz. Esta fibra además demostró capacidad de controla la fisuración por retracción plástica. Marthong et al. [7] por otro lado evaluó cinco formas distintas de geometría de la fibra de PET cuyos resultados indican que a mayor variación de la geometría se presenta una mejora en la resistencia a la flexión y compresión, con incrementos que oscilaron entre 3% y 23% respecto al patrón, donde un modelo ondulado fue el que presentó el mayor incremento.

Además de abordar la geometría, longitud y proporciones de la fibra en la mezcla se ha abordado la influencia de tratamientos térmicos a esta. Smaoui et al. [8] utilizó un tratamiento térmico en inclusiones de plástico PET reciclado que posteriormente fue utilizado como refuerzo en concreto. Estas inclusiones en forma de tiras rectangulares experimentaron inmersión en agua caliente a temperaturas de 75°C, 100°C, 150°C y 200°C. Los resultados reflejaron una influencia positiva de los tratamientos en la

resistencia a la compresión y flexión del concreto, la que resultó más significativa para los tratamientos con más altas temperaturas. Abu-Saleem et al. [9] también realiza un tratamiento de diferentes áridos plásticos reciclados pero a través de radiación de microondas, provocando una modificación de la superficie y una reducción de la hidrofobicidad del PET. De este estudio se obtuvieron mejoras en la resistencia a la compresión y flexión, aunque se resalta la influencia de la fibra tratada en la trabajabilidad de la mezcla.

A partir de esta experiencia se plantea la confección de un mortero con agregado de fibra PET tratado térmicamente, con el objetivo de determinar su influencia en la resistencia mecánica.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

En el trabajo se utilizó cemento Bío Bío Especial cumpliendo con los requisitos de la norma NCh148.Of68 [10], como árido fino se empleó la arena disponible en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción asegurando que cumple con la norma antes mencionada, el agua provino de la red pública la cual cumple con la normativa NCh1498-2012 [11], mientras que el PET se obtuvo de botellas plásticas recicladas, llevándolas a fibra de longitud 35 mm y ancho de 2 a 3 mm. En la tabla 1 se presentan las cantidades a utilizar para las mezclas de control y las que contienen agregado de fibra.

Tabla 1. Proporciones del mortero.

Material	Control (P)	Mezcla con agregado de PET (M)
Cemento [kg]	0.950	0.950
Arena [kg]	2.933	2.933
Agua [kg]	0.392	0.392
Fibra [g]	0	35,27

2.2. Métodos

2.2.1. Tratamiento térmico de la fibra PET

La fibra PET se le aplicaron 3 tratamientos térmicos, el primero en agua caliente (TPET-1), el segundo fue en microondas (TPET-2) y el tercero fue una combinación de los dos anteriores (TPET-3).

Para el tratamiento de agua caliente (TPET-1) se llevaron las fibras a un recipiente con agua caliente y se dejaron allí por 15 minutos una vez que el agua alcanzó la temperatura de 100°C.

Para el tratamiento en microondas (TPET-2) se utilizó un microondas de la marca Thomas, modelo TH-20DM donde el tratamiento se realizó en dos tiempos cada uno de 2 minutos y 30 segundos, para un total de 5 minutos.

Mientras que para el tercer tratamiento (TPET-3) a la fibra se le aplicó primero el tratamiento en agua caliente y posteriormente el tratamiento en microondas.

2.2.2. Caracterización mecánica de la fibra PET

Una vez culminados los tratamientos térmicos a la fibra PET, se realizó una caracterización mecánica de esta, determinando su resistencia a la tracción. Para esto se utilizó una máquina de ensayos universales ProLine Z005 de Zwick Roell, siguiendo la norma ASTM D638 [12], con una velocidad de ensayo de $50 \pm 10\%$ mm/min, la cual corresponde a una de las velocidades indicadas en dicha norma para materiales no rígidos. La cantidad de ensayos realizada fue de 20 para cada tipo de tratamiento térmico y la fibra sin tratamiento. Esta prueba tiene como objetivo evaluar el efecto que tienen los diferentes tratamientos térmicos en la fibra de PET.

2.2.3. Confección

Los especímenes se nombraron según la siguiente nomenclatura: espécimen de control (MP), espécimen con adición de fibra sin tratamiento (MPET), espécimen con adición de fibra con el tratamiento 1 (MPET-1), espécimen con adición de fibra con el tratamiento 2 (MPET-2) y espécimen con adición de fibra con el tratamiento 3 (MPET-3),

Para la confección de los diferentes especímenes se consideró una pérdida del 10%, y la humedad medida fue del 2.9%. Las cantidades establecidas en la Tabla 1 se amasaron de forma gradual en un mezclador de mortero considerando la norma NCh 2261-2010 [13], y NCh158.Of67 y posteriormente se añadió la fibra, a excepción del espécimen patrón. La mezcla final se colocó en moldes cuyas dimensiones internas son de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Por cada espécimen se confeccionaron 3 probetas.

Una vez culminada esta etapa se dejó fraguar la mezcla a temperatura ambiente durante tres días. Posterior a esto se realizó el desmolde y los especímenes fueron llevados a una cámara de curado hasta las edades de 7 y 28 días.

2.2.4. Asentamiento del mortero

Para determinar la docilidad en el asentamiento del mortero, una vez elaborada la mezcla, se utilizó el ensayo del cono corto siguiendo las siguientes normas: NCh171.EOf75 [14], NCh1019.Of2009 [15] y NCh2257/3.Of96 [16]. La norma chilena no incluye una tabla como referencia para el asentamiento del mortero, por lo que se utilizó la tabla 2 la cual fue elaborada a partir de la normativa NCh170 [17], considerando que el cono de hormigón mide 30 cm de alto y el de mortero 15 cm.

Tabla 2. Referencia de asentamiento de mortero.

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

2.2.5. Ensayo de flexión

Para el ensayo de flexión se utilizaron los especímenes cumplidos los tiempos de curado. El ensayo se llevó a cabo bajo la norma NCh158.Of67 [18] con una carga aplicada a una velocidad de 5 ± 1 kg/s y la resistencia a la flexión se determinó utilizando la expresión (1) donde P es la carga máxima de flexión, L es la longitud soportada, b es el ancho y d la profundidad del punto de falla.

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

2.2.6. Ensayo de compresión

Para el ensayo de compresión se utilizaron los trozos que se obtuvieron una vez realizado el ensayo de flexión. Cada fragmento se sometió a compresión en una sección de 40 x 40 mm, donde el aumento de la carga se mantuvo en el rango de 10 a 20 kg/cm²/s.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización mecánica de la fibra PET

A partir de la caracterización mecánica se obtuvo la resistencia a la tracción de la fibra sin tratar y de la fibra con los tres tratamientos térmicos. En la tabla 3 se presentan los valores promedio para cada caso, donde σ es la resistencia a la tracción y S es la desviación estándar de los resultados.

Los diferentes tratamientos térmicos provocaron cambios en la fibra lo que se puede ver expresado a través de incrementos en la resistencia a la tracción de 37.4%, 51.7% y 23.3% de las fibras TPET-1, TPET-2 y TPET-3 respectivamente respecto a la fibra sin tratar PET, siendo el de mayor incremento el del tratamiento térmico de microondas.

Tabla 3. Resistencia a la tracción de la fibra de PET.

Fibra	PET	TPET-1	TPET-2	TPET-3
σ [MPa]	79.3	108.9	120.3	97.8
S [MPa]	26.5	12.3	22.9	18.6

3.2. Docilidad del mortero

Los resultados de los ensayos de asentamiento se presentan en la Tabla 4. De estos se evidencia que las mezclas son secas con baja trabajabilidad. Esto implica un mayor esfuerzo y gasto de energía para su manipulación.

Haciendo comparaciones visuales de las mezclas se observó una disminución del asentamiento en comparación al control (MP). Según Nkomo et al. [19] esta disminución podría estar asociada a la adherencia de la fibra a la mezcla donde el uso de aditivos puede mejorar la trabajabilidad.

Tabla 4. Resistencia a la tracción de la fibra de PET.

Espécimen	Asentamiento (mm)
MP	10
MPET	0
MPET-1	0
MPET-2	0
MPET-3	0

3.3. Ensayo de flexión

La Tabla 5 y la Figura 1 presentan la resistencia a la flexión obtenida a los 7 y 28 días de curado de los diferentes especímenes. El espécimen con fibra sin tratamiento térmico (MPET) fue el que presentó el mejor resultado de 10.48 MPa a los 28 días, aunque se debe destacar que la resistencia a la flexión de todos los especímenes fue mayor que la del control (MP) con incrementos de 24.2%, 22.2%, 15.3% y 9.8% para MPET, MPET-1, MPET-2 y MPET-3 respectivamente. La disminución de la resistencia respecto al control de los especímenes que contienen fibra tratada térmicamente puede estar asociada a un aumento de la porosidad producto de la curvatura que toma la fibra una vez que sufre cada tratamiento. Por otro lado, se destaca que la incorporación de fibra favorece la concentración de grietas y prevé su propagación lo que coincide con el estudio realizado por Smaoui et al. [8].

Para el caso del mortero patrón (MP) la fractura presentada fue de tipo frágil, separándose en dos partes, mientras que para los especímenes que contenían fibras, primero se mostraron grietas sin llegar a una ruptura total quedando ambas partes unidas por las fibras. Este comportamiento coincide con los estudios realizados por Smaoui et al. [8] y Rahmani et al. [20] quienes atribuyen una mejora de la ductilidad a la presencia de la fibra en la mezcla de mortero.

Tabla 5. Valores de la resistencia a la flexión del mortero con fibra de PET.

Espécimen	Edad [días]			
	7	7	28	28
	σ [MPa]	S [MPa]	σ [MPa]	S [MPa]
MP	6.35	0.29	8.44	0.90
MPET	6.77	0.89	10.48	0.75
MPET-1	6.19	0.33	10.31	0.66
MPET-2	6.27	0.32	9.73	0.40
MPET-3	6.65	0.71	9.27	0.31

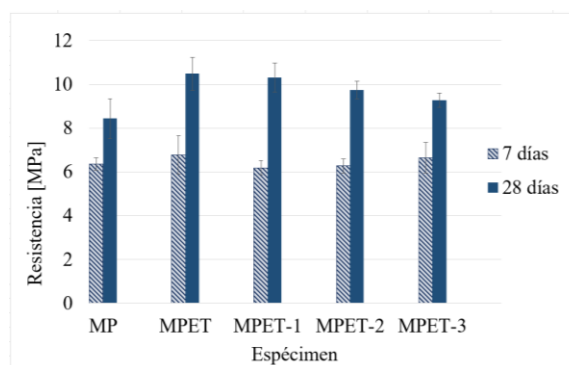


Figura 1. Resistencia a flexión de los especímenes.

3.4. Ensayo de compresión

Los resultados del ensayo de compresión se presentan en la Tabla 6 y Figura 2 para las edades de 7 y 28 días. A partir de estos se observó una mejora en la resistencia a la compresión a los 28 días, para los especímenes MPET, MPET-2 y MPET-3 quienes presentaron incrementos de 7.9%, 4% y 5.5% respectivamente respecto al patrón. Para este ensayo nuevamente es la fibra sin tratar quien presenta el mejor resultado con un valor de 28.53 MPa, mientras que dentro de los especímenes con tratamiento el que se comportó mejor fue MPET-3 que corresponde a la fibra con la combinación de tratamientos.

El espécimen MPET-1 fue el que menor resistencia presentó con un valor de 24.27 MPa lo que representa un decrecimiento en la resistencia respecto al patrón de 8.2%. Este comportamiento pudo estar dado a una distribución aleatoria de las fibras que terminaron afectando la resistencia, tal como indica Das et al. [21]. Esta condición sumada a la tendencia de la fibra a enredarse producto del tratamiento también pudo crear puntos débiles dentro de la mezcla, tal como plantea Pujadas et al. [22].

Tabla 6. Valores de la resistencia a la compresión del mortero con fibra de PET.

Espécimen	Edad [días]			
	7	7	28	28

	σ [MPa]	S [MPa]	σ [MPa]	S [MPa]
MP	14.44	0.35	26.45	0.97
MPET	18.74	0.52	28.53	1.33
MPET-1	16.20	0.72	24.27	0.86
MPET-2	15.874	0.20	27.50	0.53
MPET-3	17.26	0.49	27.90	0.72

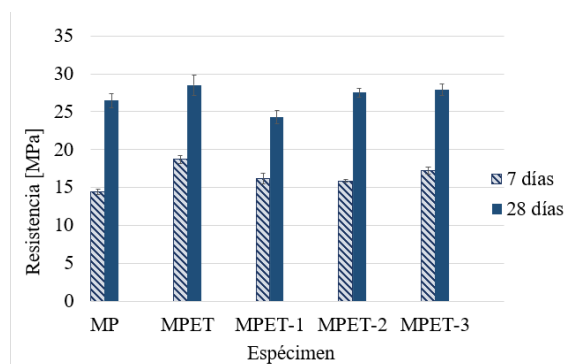


Figura 2. Resistencia a la compresión de los especímenes.

4. Conclusiones

El presente trabajo ofrece un análisis detallado de cómo el tratamiento térmico de fibras de PET influye en las propiedades mecánicas del mortero. A continuación, se profundizan las conclusiones obtenidas del estudio:

Los tratamientos térmicos aplicados a las fibras de PET demostraron una mejora significativa en la resistencia a la tracción, especialmente el tratamiento con microondas, que aumentó la resistencia en un 51.7% en comparación con las fibras sin tratar. Esto indica que la aplicación de calor, y en particular el uso de microondas altera la estructura interna de las fibras, mejorando su capacidad de resistir fuerzas tensionales.

A pesar de la mejora en la resistencia a la tracción de las fibras, los resultados mostraron que las fibras sin tratamiento térmico presentaron mejor desempeño en los ensayos de flexión y compresión del mortero. En particular, el mortero con fibras sin tratar mostró una resistencia a la flexión y a la compresión superiores a las mezclas con fibras tratadas térmicamente. Esto sugiere que el tratamiento térmico, aunque fortalece las fibras en términos de tracción, puede comprometer otros aspectos, como la interacción con la matriz del mortero o la creación de defectos como porosidades debido a la curvatura que toma la fibra tratada.

Se observó una disminución en la trabajabilidad de las mezclas con fibras de PET, lo cual fue más notable en las mezclas con fibras tratadas térmicamente. Esto se debe a la adherencia aumentada de las fibras y su tendencia a enredarse, lo que complica la manipulación de la mezcla. Esta reducción en la

trabajabilidad sugiere la necesidad de incorporar aditivos que faciliten la mezcla y el manejo del mortero.

A pesar de algunos desafíos en trabajabilidad y variaciones en la resistencia dependiendo del tipo de tratamiento, el uso de fibras de PET tratadas térmicamente muestra un potencial significativo para su aplicación en la construcción. Las mejoras en resistencia mecánica que superan a la mezcla de control, excepto en el caso del tratamiento con agua caliente, hacen que estas mezclas sean atractivas para diversas aplicaciones donde se requiere un equilibrio entre resistencia y ductilidad.

Se recomienda seguir explorando la combinación de tratamientos térmicos y la optimización de las proporciones de las fibras para mejorar tanto la resistencia como la trabajabilidad del mortero. Además, es importante estudiar el impacto a largo plazo de estas fibras en estructuras reales, considerando factores como la durabilidad y la resistencia al impacto.

En resumen, el estudio aporta una valiosa comprensión de cómo las modificaciones térmicas de las fibras de PET pueden influir en las propiedades del mortero, abriendo la puerta a nuevas formas de reutilización de materiales reciclados en la industria de la construcción, siempre que se consideren cuidadosamente las condiciones de trabajo y las propiedades deseadas del material final.

5. Referencias

- [1] S. Spadea, I. Farina, A. Carrafiello, and F. Fraternali, "Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 80, pp. 200–209, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075.
- [2] Maryam. H. Naser, F. H. Naser, and 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, p. 120244, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120244.
- [3] N. Ranjan, S. Banerjee, S. Nayak, and 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.
- [4] T. Zerig, A. Aidoud, M. Belachia, T. Djedid, and 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.

- [5] S. Orasutthikul, D. Unno, and 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, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.134.
- [6] J. H. J. Kim, C. G. Park, S. W. Lee, S. W. Lee, and 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, no. 3, pp. 442–450, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.compositesb.2007.05.001.
- [7] C. Marthong and D. K. Sarma, "Influence of PET fiber geometry on the mechanical properties of concrete: an experimental investigation," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 7, pp. 771–784, Aug. 2016, doi: 10.1080/19648189.2015.1072112.
- [8] H. Smaoui, A. Trabelsi, Z. Kammoun, and B. Aouicha, "Mechanical, physical, blast waves and ballistic impact resistance properties of a concrete incorporating thermally treated PET inclusions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 365, p. 130088, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130088.
- [9] M. Abu-Saleem, Y. Zhuge, R. Hassanli, M. Ellis, M. M. Rahman, and P. Levett, "Microwave radiation treatment to improve the strength of recycled plastic aggregate concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, p. e00728, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00728.
- [10] "NCh 148 Of.148: 'Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales'."
- [11] Instituto Nacional de Normalización, "Norma Chilena Oficial Nch 1498 Hormigón y mortero - Agua de amasado - Clasificación y requisitos." Chile, 2012.
- [12] "ASTM D638-14. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA." 2014.
- [13] Instituto Nacional de Normalización, "Norma Chilena Oficial Nch 2261 Morteros - Confección de probetas en obra y determinación de la resistencia a compresión." Chile, 2010.
- [14] "NCh171.EOf75: Hormigón - Requisitos generales."
- [15] "NCh 1019.Of2009: 'Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.'" [Online]. Available: <https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NC h1019Of2009.pdf>
- [16] "NCh2257/3.Of96: Morteros - Determinación de la consistencia - Parte 3: Método del asentamiento del cono."
- [17] "NCh 170 Of.2016: 'Hormigón - requisitos generales'."
- [18] Instituto Nacional de Normalización, "Norma Chilena Oficial Nch 158 Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento." Chile, 1967.
- [19] N. Nkomo, L. Masu, and P. Nziu, "Effects of Polyethylene Terephthalate Fibre Reinforcement on Mechanical Properties of Concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2022, no. 1, p. 4899298, 2022, doi: 10.1155/2022/4899298.
- [20] E. Rahmani, M. Dehestani, M. H. A. Beygi, H. Allahyari, and 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.
- [21] C. S. Das, T. Dey, R. Dandapat, B. B. Mukharjee, and 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.
- [22] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalero, A. de la Fuente, and A. Aguado, "Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels," *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 496–503, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.067.