

Análisis exploratorio del aprovechamiento de residuos plásticos como agregados finos en morteros de cemento y geopolímeros

Krishna Prakash Arunachalam¹, Canales Cárdenas, Cristian Alexis^{2*}, Rakesh Kuchana³, Samatha Bairi³, Siva Avudaiappan^{1*}

¹Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Ciencias de la Construcción Ordenamiento Territorial, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile. k.prakash@utem.cl, s.avudaiappan@utem.cl

²Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. cristcanales@udec.cl

³Guntur Engineering College, Opp. Katuri Medical College, Yanamadala, Andhra Pradesh, 522019, India. rakeshinfra509@gmail.com, bairisamatha795@gmail.com

Resumen

Chile enfrenta actualmente un creciente problema relacionado con los desechos plásticos, que ascienden a 1,2 millones de toneladas por año. Los expertos están examinando actualmente la posibilidad de utilizar recursos de desechos sólidos como materiales de construcción. Este estudio exploró la utilización de desechos plásticos (PW), tereftalato de polietileno y desechos de poliolefina como reemplazo de agregado fino en mortero geopolimérico. PW se utilizó como sustituto de agregado fino natural en mortero geopolimérico, reemplazando 0%, 10%, 20%, 30% y 40% en volumen. Las mezclas resultantes se compararon luego con un mortero de cemento estándar. Los morteros se sometieron a experimentos de laboratorio para determinar su densidad, absorción de agua, porosidad, flujo, conductividad térmica, UPV y resistencias mecánicas. Los resultados de estas pruebas se compararon luego con el mortero de cemento Portland convencional. Los hallazgos demostraron que a medida que aumentaba la cantidad de basura plástica, las características mecánicas del mortero geopolimérico disminuían. El aumento de la concentración de residuos plásticos del 0% al 40% dio como resultado una caída de la resistencia a la compresión del 70% para los morteros de geopolímero y del 53% para los morteros de cemento. Los morteros de cemento y geopolímero que incluían PW mostraron una mejora en la resistencia a la flexión en comparación con la relación de resistencia a la compresión. Además, a medida que aumentaba la concentración de PW, la conductividad térmica y la densidad de los morteros disminuyeron notablemente; para el mortero de geopolímero, la densidad varió de 2222 a 1886 kg/m³ y para el mortero de cemento, de 2389 a 1957 kg/m³, y la conductividad térmica para el mortero de geopolímero varía de 1,4354 a 0,7219 W/m.K, y para el mortero de cemento varía de 2,1953 a 1,2190 W/m.K. Los residuos plásticos reducen el peso del mortero y mejoran su rendimiento térmico. Este novedoso enfoque reduce los residuos plásticos y hace que el hormigón sea más ligero y mejor para el aislamiento térmico.

Palabras clave: Mortero geopolimérico, aprovechamiento de residuos plásticos, propiedades mecánicas, sustitución de áridos finos, conductividad térmica.

Abstract

Chile is currently dealing with a growing problem related to plastic waste, amounting to 1.2 million tonnes per year. Experts are currently examining the possibility of using solid waste resources as construction materials. This study explored the utilization of plastic waste (PW) polyethylene terephthalate and polyolefin waste as a replacement for fine aggregate in geopolymer mortar. PW was utilised as a substitute for natural fine aggregate in geopolymer mortar, replacing 0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by volume. The resulting mixtures were then compared to a standard cement mortar. The mortars were subjected to laboratory experiments to determine their density, water absorption, porosity, flow, thermal conductivity, UPV and mechanical strengths. The findings of these tests are then compared to conventional Portland cement mortar. The findings demonstrated that as the amount of plastic trash increased, the mechanical characteristics of the geopolymer mortar declined. Increases in Plastic Waste concentration from 0% to 40% resulted in a drop in compressive strength 70% for geopolymer mortars and for 53% cement mortars. Cement mortars and geopolymer that included PW showed an improvement

in the strength of flexural comparing to compressive strength ratio. Furthermore, as the PW concentration increased, mortars thermal conductivity and density are noticeably decreased; for geopolymer mortar, density ranged from 2222 to 1886 kg/m³ and for cement mortar, from 2389 to 1957 kg/m³, and the thermal conductivity for geopolymer mortar ranges from 1.4354 to 0.7219 W/m.K, and for cement mortar it ranges from 2.1953 to 1.2190 W/m.K. Plastic waste lower mortar's weight and improve its thermal performance. This novel approach reduces plastic waste and makes concrete lighter and better for thermal insulation.

Keywords: Geopolymer Mortar, Plastic Waste Utilization, Mechanical Properties, Fine aggregate replacement Thermal conductivity.

1. Introducción

La generación de residuos plásticos ha aumentado día a día en todo el mundo (Gondal et al., 2023). El Programa de Medio Ambiente de los EE. UU. informa que la cantidad de basura plástica creada cada año está aumentando a un ritmo del 4,6%, alcanzando los 400 millones de toneladas. El nueve por ciento de la basura plástica del mundo se recicla, mientras que el doce por ciento se incinera (da Luz Garcia et al., 2021), la mayor parte del plástico restante (79%) termina en vertederos o cuerpos de agua. La expulsión de contaminantes atmosféricos nocivos como furanos, dioxinas y partículas en suspensión, así como el aumento de las concentraciones de microplásticos y metales pesados en los sistemas acuáticos debido a los procesos de degradación y la disminución de la permeabilidad del agua y la fertilidad del suelo de los rendimientos agrícolas, son algunos de los principales problemas ambientales causados por la eliminación descuidada y la quema a cielo abierto de residuos plásticos. Existe una necesidad inmediata de que los investigadores desarrollen formas seguras, eficaces, asequibles y respetuosas con el medio ambiente de abordar la creciente cantidad de residuos plásticos de un solo uso (RP) (Zhang et al., 2023). Los atributos deseables, como la baja capacidad de absorción de agua, la baja conductividad eléctrica y térmica, la resistencia a la corrosión y la alta capacidad de resistencia al impacto, de los residuos plásticos indican que podrían ser un sustituto prometedor, eficiente y respetuoso con el medio ambiente de los áridos gruesos y finos naturales en la producción de hormigón de cemento. Esta utilización de residuos plásticos se alinea con los principios de una economía circular. Los áridos constituyen alrededor del 60-80% del hormigón, y el consumo anual total de áridos necesarios para satisfacer esta demanda es de alrededor de 13.120 millones de toneladas (Islam y Shahjalal, 2021; Naderi y Kaboudan, 2021). La extracción y el procesamiento de áridos naturales a través de una cantera es una actividad ecológicamente perjudicial que da lugar a un mayor consumo de energía y a la liberación de gases de efecto invernadero (GEI). También conduce a la degradación del paisaje, la desestabilización de la tierra, la contaminación de los recursos hídricos, la contaminación atmosférica y efectos sociales adversos

como el vandalismo. El uso de desechos plásticos como reemplazo de agregados naturales en los esfuerzos de reciclaje tiene el potencial de reducir de manera efectiva la ocurrencia de peligros ambientales y problemas sociales debido a la extracción de agregados naturales (Jain et al., 2023). En el pasado, se han realizado investigaciones sobre el tema de determinar la resistencia del hormigón a partir de agregados plásticos de desecho (Sim y Park, 2011). El hormigón elaborado con agregados plásticos reciclados tiene mucho potencial, pero hay escasez de investigaciones sobre su resistencia (Zega y Di Maio, 2011). Las muestras de mortero que incluían solo agregados de PET absorbieron más agua en comparación con una mezcla de PET y arena (Akçaözoglu et al., 2010). Cuando se utiliza un 75% de agregado de polietileno (LDPE) de baja densidad en reemplazo de agregado natural fino, hay una caída en el coeficiente de sorción del 31% (Ohemeng y Ekolu, 2019). Otro estudio analizó la posibilidad de utilizar HDPE como sustituto adecuado de hasta un 12 % de CA con respecto a la capacidad de adsorción de agua (Majeed et al., 2019). Además, se menciona que agregar un 6 % adicional de HDPE aumentó la capacidad de adsorción de agua en un 75 %. Los materiales de construcción que incluyen WP han mostrado cualidades materiales favorables en términos de disminución de la densidad, conductividad térmica y peso unitario, en comparación con el hormigón que no incorpora la sustitución de WP. Sin embargo, el aumento de la cantidad de WP conduce a una disminución de las cualidades mecánicas de los materiales de construcción. Algunas aplicaciones de WP en materiales de construcción son mezclas asfálticas, hormigón bituminoso, bloques de adoquín y ladrillos (Lazorenko et al., 2022). El silicato de sodio es el ingrediente clave en el hormigón geopolimérico, que tiene las ventajas adicionales de un menor consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono en comparación con el hormigón convencional (Sun et al., 2020).

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos de aluminosilicato de tres dimensiones (Simão et al., 2021) elaborados mediante la reacción de desechos agrícolas ricos en aluminosilicato, municipales, industriales y subproductos como cenizas de cáscara de arroz, GGBS, cenizas volantes, etc. con una solución

acuosa alcalina (Skariah Thomas et al., 2022), (Nath & Sarker, 2014). En la investigación realizada por Hama y Hilal (Hama & Hilal, 2017) se observan los resultados del uso de desechos plásticos como reemplazo parcial de arena en el hormigón, los valores de resistencia a la compresión oscilaron entre alrededor de 65 MPa y 37 MPa, y se demostró que la resistencia disminuyó con el aumento del porcentaje de plástico en comparación con la mezcla de control sin WP. Se observó que los desechos plásticos eran más blandos que el agregado natural, lo que provocó una reducción de la resistencia. Además, Pacheco-Torgal (Pacheco-Torgal, 2019) utilizó tereftalato de polietileno (PET) de botellas de plástico para reemplazar parcialmente la arena en el hormigón OPC, con un reemplazo máximo de plástico del 50%. Se estudiaron los efectos de esta sustitución. La investigación determinó que era factible sustituir el PET reciclado en hormigón respetuoso con el medio ambiente a tasas específicas. Esta decisión se tomó en parte porque el uso de PET en lugar de arena reduce el peso propio del hormigón, lo que lo hace más adecuado para su uso en piezas no estructurales que no necesitan mucha resistencia a la compresión. En los estudios realizados por Shaikh (Shaikh, 2020), utilizó fibra de PET reciclada de 12-19 mm de longitud para reforzar el hormigón a base de cenizas volantes OPC y el hormigón geopolímero. La resistencia a la compresión de los compuestos de geopolímeros aumentó a 57 MPa y 47 MPa, respectivamente, con la adición de 1,0 y 1,5 % de fibras de PET. En comparación con la mezcla de control sin plástico, los hormigones geopoliméricos hechos de desechos de PET, cenizas volantes y escoria de alto horno redujeron la resistencia a la tracción a 1,2 MPa y la resistencia a la compresión a 13,8 MPa. En consecuencia, las características mecánicas mejoraron marginalmente debido a la sustitución del 10% de gránulos de plástico por arena en el agregado fino (Chithambar Ganesh et al., 2021). En su evaluación de compuestos geopoliméricos innovadores para la construcción sostenible, Lazorenko et al. (Lazorenko et al., 2022) utilizaron WP como rellenos e incluyeron plástico de desecho de diferentes tamaños y formas. Los hallazgos demostraron que el hormigón geopolimérico que

contiene pequeñas partículas de WP exhibió una excelente resistencia, sin embargo, la trabajabilidad del geopolímero disminuyó con el aumento del tamaño de las partículas de WP. Los autores recomendaron que el hormigón geopolimérico utilice plásticos reciclados a una tasa del 50% como sustituto de los agregados gruesos. La utilización de WP como agregado fino en el hormigón geopolimérico no se ha estudiado ampliamente. El objetivo de esta investigación es determinar las propiedades mecánicas y microestructurales del geopolímero resultante de la utilización de WP como sustituto de los agregados finos en la producción de morteros de geopolímeros de manera sostenible y comparándolos con los morteros normales. Los objetivos del presente estudio son reforzar lo que ya se sabe sobre la investigación del hormigón geopolimérico, promover un futuro más respetuoso con el medio ambiente y sostenible en la industria de la construcción e inspirar prácticas más conscientes con el medio ambiente en la creación de hormigón geopolimérico.

2. Estudio experimental

2.1. Método de producción y prueba de mezclas

Como materiales de aluminosilicato, se utilizó ceniza volante seca con una gravedad específica de 2,4 y alrededor del 40% de partículas menores de 7 μm . La Figura 1 muestra los agregados finos de desechos plásticos utilizados en esta investigación. Para este trabajo, utilizamos vidrio de desecho plástico que tenía un tamaño de entre 0,75 y 1 mm. El mortero de geopolímero se fabricó utilizando los siguientes ingredientes: NaOH 10 M, una relación de agregado a aglutinante de 2,75:1, una relación de solución alcalina líquida a ceniza volante de 0,70:1 y una relación de hidróxido de sodio a silicato de sodio de 1,00:1. Las propiedades de la ceniza volante y el cemento se dan en la Tabla 1. Se crearon un total de cinco mezclas diferentes, con relaciones de volumen correspondientes de 0%, 10%, 20%, 30% y 40% PW a arena: GP0, GP10, GP20, GP30, GP40. Las tres mezclas de mortero de cemento fueron OPC0, OPC10



Figura 1: Residuos plásticos Agregados finos y muestras fundidas de agregados plásticos

y OPC20, donde OPC0 representa 0% PW al volumen de reemplazo de arena, OPC10 representa 10% y OPC20 representa 20%. El nivel de sustituto de arena se limitó a 20-40% en la presente investigación debido a preocupaciones de trabajabilidad. La relación agua por cemento empleada fue 0,50, mientras que la relación aglutinante a agregado fue 2,64. Las relaciones específicas para las mezclas de cemento y mortero de geopolímero se pueden encontrar en la Tabla 2. El proceso de mezclado del geopolímero comenzó combinando cenizas volantes y una solución de hidróxido de sodio durante 5 minutos, luego se agregaron los agregados y se mezclaron completamente durante 5 minutos, se introdujo una solución de silicato de sodio y se mezcló bien durante 5 minutos adicionales. Luego, el mortero de geopolímero se vierte en moldes y se somete a vibración durante 10 segundos para asegurar una compactación efectiva para minimizar la segregación. Luego, las muestras se envolvieron en film transparente para evitar pérdidas de humedad, luego las muestras se sometieron a curado en un horno a una temperatura de 60°C durante 48 horas. Después del curado, las muestras se retiran de los moldes y se colocan en un ambiente controlado con una humedad relativa del 50% y una temperatura de 22°C durante un período de tiempo de 28 días. El mortero de cemento se vertió de acuerdo con las pautas de ASTM C305. Después del proceso de mezclado, las muestras se sometieron a vibración y se curaron según el procedimiento seguido para el geopolímero; después del secado, las muestras se retiraron del molde y se sometieron a inmersión en agua para el curado antes de la prueba. Las propiedades físicas y la resistencia mecánica de las muestras con 28 días de mortero endurecido se evalúan mediante varias pruebas. Estas pruebas incluyen la medición de la absorción de agua, la porosidad, la densidad, el UPV, la resistencia a la tracción por hendidura, la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión. La conductividad térmica se determinó como se especifica en la ASTM D5930-17.

Tabla 1. Composición química del OPC y las cenizas

Composición química	Cemento	Cenizas
SiO ₂	20.4	42.6
Al ₂ O ₃	6.55	24.4
Fe ₂ O ₃	3.56	12.8
CaO	66	14.3
MgO	1.75	2.1
K ₂ O	0.54	2.6
Na ₂ O	0.25	0.21
SO ₃	0.42	0.53

Tabla 2. Proporciones de mezcla de mortero de cemento y mortero de geopolímero

Mix	OPC	FA	NH	NS	Arena	PW	Agua
OPC0	546	-	-	-	1624	-	294
OPC10	546	-	-	-	1462	83	294
OPC20	546	-	-	-	1299	132	294
GP0	-	493	159	159	1624	-	-
GP10	-	493	159	159	1462	83	-
GP20	-	493	159	159	1299	132	-
GP30	-	493	159	159	1137	204	-
GP40	-	493	159	159	974	298	-

Las muestras, que tenían dimensiones de 50 mm x 50 mm, se sometieron a una prueba de resistencia a la compresión. Un prisma de 160 x 40 x 40 mm se sometió a una prueba de resistencia a la flexión, mientras que el cilindro de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura se sometió a una prueba de resistencia a la tracción por hendidura. Las muestras que tenían dimensiones de 100 mm x 100 mm se sometieron a pruebas para medir la conductividad térmica y la velocidad del pulso ultrasónico. Los resultados son los valores medios obtenidos de tres muestras en cada combinación.

3. Resultados y discusión

3.1. Valor de flujo

Los valores de flujo del mortero de cemento y del mortero geopolimérico con diferentes porcentajes de PW se ilustran en la Figura 4. A medida que aumentaba el volumen de PW, el valor de flujo caía bruscamente. Con un aumento del 40% en PW, el flujo del mortero geopolimérico se redujo del 141% al 72%. Agregar un 20% de basura de PW al OPC redujo el caudal del 121% al 111%. Las partículas tienen una gran angularidad y provocaron que el flujo del mortero disminuyera. Otras investigaciones han llegado a conclusiones similares (Batayneh et al., 2007). Además, según Krishna et al. (Prakash et al., 2023), los albañiles locales prescribirían caudales de mortero del 65% al 75% para el mortero para juntas de ladrillos y del 100% al 110% para el enlucido de ladrillos de arcilla. Se registraron valores de fluidez que oscilaron entre el 99% y el 112% tanto para el cemento como para el mortero de geopolímero cuando se reemplazó la arena con 10% y 20% de PW por volumen, respectivamente. Este rango es adecuado para operaciones de enlucido. El trabajo de juntas de ladrillo se realizó con éxito sustituyendo entre el 30% y el 40% del volumen de desechos de PW por agregado fino natural en el mortero de geopolímero.

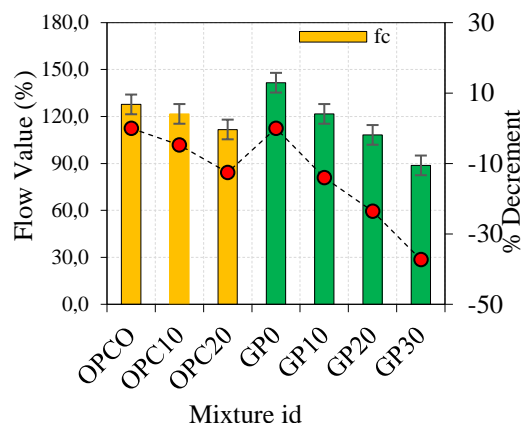


Figura 2. Valor de fluidez del mortero de cemento y mortero de geopolímero

3.2. Absorción de agua, porosidad, densidad, UPV, densidad de cemento y morteros de geopolímeros

Los resultados de la absorción de agua, la porosidad, la densidad, el UPV y la densidad de los morteros se ilustran en la Figura 3. La densidad del mortero de cemento y del mortero de geopolímero, que incluía PW, disminuyó a medida que aumentaba la cantidad de PW. Otros investigadores también han demostrado que el PW provoca una disminución de la densidad seca del mortero (Almeshal et al., 2020). Además, la sustitución de arena por PW mejoró la permeabilidad y disminuyó la densidad. La Tabla 3 muestra la disminución de la densidad resultante de la sustitución de arena por residuos plásticos. Los hallazgos demostraron que la utilización de varios agregados de residuos plásticos ligeros resultó en una disminución de la densidad del mortero. Si bien los morteros de geopolímero y OPC tenían la misma cantidad de PW, la comparación de densidad reveló que el mortero de geopolímero era un poco menos denso que el mortero de cemento. Los morteros que contenían un 40% de PW exhibieron valores de densidad significativamente bajos de 1886 kg/m³. El uso de mortero de geopolímero con PW puede reducir sustancialmente la carga muerta estructural. A diferencia de la porosidad y la densidad, la absorción de agua exhibió un aumento con un mayor contenido de PW. El mortero de geopolímero exhibió un aumento en la porosidad del 24,7 % al 30,1 % y un aumento en la absorción de agua del 8,7 % al 9,9 %. La elevada absorción de agua fue causada por la mayor porosidad del mortero, lo que facilitó la infiltración de agua en la muestra con mayor facilidad. Debido a la unión muy débil entre la matriz de cemento y el PW, se formaron poros en la zona de transición interfacial, lo que llevó a un aumento de la porosidad en el mortero que contenía PW (Avudaiappan, Cendoya, et al., 2023). Los datos que se muestran en la Tabla 3 muestran que la inclusión de una mayor cantidad de PW en los morteros resultó en una disminución del

valor en los resultados de la prueba UPV. Los resultados de la prueba UPV del mortero de geopolímero de control se midieron inicialmente como 2749 m/s. Cuando se añadió un 40 % de PW a la mezcla de mortero, la UPV disminuyó a 1785 m/s. La incorporación de PW en los compuestos de cemento provocó una disminución de la velocidad del pulso ultrasónico debido a la menor densidad de PW en comparación con el agregado natural y aumenta la porosidad. La prueba UPV es un método de no destrucción empleado para identificar huecos y grietas en el hormigón. Además, podría utilizarse para evaluar la calidad del hormigón (Avudaiappan, Cuello Moreno, et al., 2023).

Tabla 3. Absorción de agua, porosidad, densidad, UPV, densidad y conductividad térmica de morteros de cemento y geopolímeros

Mix	Absorción de agua	Porosidad (%)	UPV (m/s)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m.K)
OPCO	6.3	13.01	4143	2389	2.1953
OPC10	7.6	18.6	3352	2168	1.6254
OPC20	8.2	25.9	2692	1957	1.2190
GP0	8.1	20.1	2749	2222	1.4354
GP10	8.7	24.7	2554	2206	1.1029
GP20	9.1	28.0	2395	2062	0.9130
GP30	9.2	29.6	1990	1904	0.8180
GP40	9.9	30.1	1785	1886	0.7219

3.3. Conductividad térmica

La muestra de geopolímero GP0 tiene una conductividad térmica de 1,4354 W/m·K, pero hay una caída en la conductividad térmica a un rango de 1,1029-0,7219 W/m·K después de agregar 10-40% de materiales PW. La reducción en la conductividad se alinea con los hallazgos de Hacini et al. (Hacini et al., 2021), quienes investigaron el potencial de incorporar desechos plásticos de polietileno en el mortero. Su estudio también revela que cuando la cantidad de contenido de plástico aumenta, la conductividad térmica del mortero disminuye. La disminución de la conductividad térmica del mortero que contiene PW exhibió un patrón comparable al observado en el hormigón liviano (Kavitha et al., 2024; Patil et al., 2024). La adición de PW resultó en un aumento en el número de poros en el material. La conductividad térmica del aire atrapado, que es de 0,024 W/m·K, es significativamente menor que la de otros materiales (Arunachalam et al., 2024), lo que da como resultado una reducción adicional de la conductividad térmica. Además de la disminución de la conductividad térmica en comparación con el agregado natural, el PW actúa como aislante. Durante el proceso de reemplazo de PW, el mortero de geopolímero exhibió una conductividad térmica reducida en comparación con el

mortero de cemento. El mortero de geopolímero tiene un efecto significativo en la conductividad térmica debido a su menor densidad y mayor porosidad en comparación con el mortero de cemento. La Tabla 3 presenta los valores de conductividad térmica.

3.4. Resistencia mecánica de morteros de cemento y geopolímeros

Los parámetros de resistencia del geopolímero, así como del mortero de cemento que contiene PW, se ilustran en la Figura 3. Según los resultados del estudio, la utilización de PW resultó en una reducción de las características tanto del mortero de cemento como del mortero de geopolímero. Los morteros de geopolímero exhibieron resistencias a la compresión que oscilaron entre 46,85 y 13,76 MPa cuando se mezclaron con 0-40% de PW, mientras que el mortero de cemento tuvo resistencias a la compresión que oscilaron entre 54,47 y 25,10 MPa cuando se mezcló con 0-20% de PW. Este hallazgo se alinea con estudios anteriores que han indicado que la sustitución de arena con PW da como resultado una reducción en la resistencia del mortero o el hormigón (Almeshal et al., 2020). La resistencia a la compresión reducida es el resultado de aumentar la relación PW-arena. Un problema importante que reduce la resistencia a la compresión del mortero con PW es la débil fuerza de unión entre la matriz de cemento y PW (Safi et al., 2013). La resistencia a la compresión del mortero de geopolímero y cemento que contiene PW se reduce debido a la mayor porosidad causada por la existencia de varios poros en la zona de transición interfacial. Los tipos N, S y M de mortero de mampostería deben tener resistencias mínimas a la compresión de 6,2, 14,5 y 20 MPa, respectivamente, de acuerdo con ASTM C91. Las especificaciones del mortero de tipo M se cumplieron con las combinaciones que contenían de 10 a 20% en volumen de PW en morteros de geopolímero y cemento, ya que sus resistencias a la compresión fueron mayores de 20 MPa. Además, las especificaciones del mortero de tipo S se cumplieron con la mezcla PG30 con una resistencia a la compresión de 16,73 y las especificaciones del mortero de tipo N con la mezcla PG40 con una resistencia a la compresión de 13,76 MPa. La densidad debe oscilar entre 1140 y 1850 kg/m³, y la resistencia a la compresión es de 17,0 a 41,0 MPa para cumplir con el requisito de peso ligero estructural, de acuerdo con ACI 213R-14. Esto significa que el hormigón ligero estructural es el resultado que se produce cuando añadimos entre un 10 y un 20 % de PW al mortero. En términos de la respuesta a la tensión del mortero de geopolímero, el aumento del contenido de PW dio como resultado unas resistencias a la flexión y a la tracción más bajas. Las resistencias a la tracción por hendidura y a la flexión fueron de 7,62-3,16 y de 4,09-1,21 MPa, respectivamente, cuando se incorporó entre un 0 y un

40 % de PW, como se ilustra en la Figura 3. Las resistencias a la flexión y al agrietamiento del mortero de cemento también se redujeron con el PW.

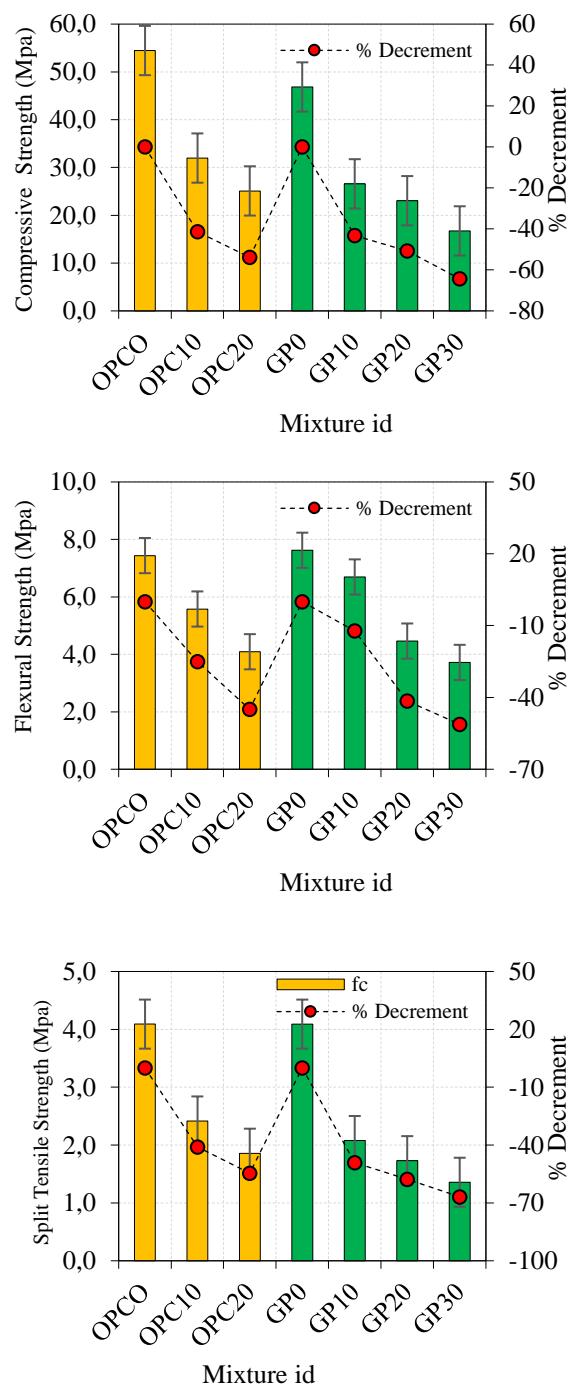


Figura 3. Resistencia a la compresión, flexión y tracción de morteros de cemento y morteros geopoliméricos

Debido a que el PW tiene una superficie lisa, forma una unión débil con la pasta, lo que reduce su resistencia a la tracción (Marzouk et al., 2007). Sin embargo, en

comparación con la resistencia a la compresión, la caída de la resistencia a la flexión fue menor. El comportamiento puede atribuirse a la carga de la matriz que interactuó con el PW antes de que se rompiera la muestra y a la flexibilidad del PW (Hannawi et al., 2010). Los morteros de geopolímeros y cemento que contienen PW tuvieron un menor impacto en la resistencia a la flexión en comparación con la resistencia a la compresión.

4. Conclusiones

La sustitución de una parte de arena por tereftalato de polietileno (PW) desechado provocó un deterioro de las características de resistencia del mortero geopolimérico que contenía cenizas volantes. Se observó una notable caída tanto de la resistencia a la compresión como de la resistencia a la tracción por hendidura a medida que aumentaba la cantidad de PW. El PW exhibió una morfología caracterizada por formas escamosas y angulares. Además, poseía cualidades flexibles, lo que le permitía soportar la tensión transferida desde la matriz hasta que se fracturaba. En consecuencia, la inclusión de PW en el mortero condujo a una mayor relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión. El mortero que incorporaba PW exhibió una mayor absorción de agua y porosidad debido a una ZIT más amplia entre la pasta de cemento y el PW. La utilización de PW resultó en una disminución de la densidad, que tiene el potencial de ser ventajosa en la creación de materiales livianos, disminuyendo así la carga de peso sobre las estructuras. Además, la sustitución de una parte de PW tiene el potencial de mejorar la eficiencia térmica tanto del mortero de cemento como del mortero geopolimérico. La incorporación de 30% y 40% de PW por volumen en mortero de geopolímero condujo a una reducción significativa de la conductividad térmica, transformándolo en un material eficaz de aislamiento. Este beneficio podría aprovecharse en el mortero de mampostería para disminuir la conductividad térmica en la estructura, lo que conduce a un menor consumo de energía.

5. Referencias

- [1]. Akçaözoglu, S., Atiş, C. D., & Akçaözoglu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2), 285–290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- [2]. Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & Mohamed, A. M. (2020). Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4631–4643. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.090>
- [3]. Arunachalam, K. P., Avudaiappan, S., Senepa, M. V. G., Cardenas, C. A. C., Moreno, P. I. C., Marzioletti, T., & Ahmed, S. M. (2024). Exploring the Potential of Pumice Stone as Coarse Aggregate: An Experimental Approach to Reduce Concrete Self-Weight. In E. I. Saavedra Flores, R. Astroza, & R. Das (Eds.), *Recent Advances on the Mechanical Behaviour of Materials* (pp. 305–314). Springer Nature Switzerland.
- [4]. Avudaiappan, S., Cendoya, P., Arunachalam, K. P., Maureira-Carsalade, N., Canales, C., Amran, M., & Parra, P. F. (2023). Innovative Use of Single-Use Face Mask Fibers for the Production of a Sustainable Cement Mortar. *Journal of Composites Science*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/jcs7060214>
- [5]. Avudaiappan, S., Cuello Moreno, P. I., Montoya R, L. F., Chávez-Delgado, M., Arunachalam, K. P., Guindos, P., Marzioletti B, T., Fernando Parra, P., Saavedra Flores, E. I., & Flores Arrey, J. I. (2023). Experimental investigation on the physical, microstructural, and mechanical properties of hemp limecrete. *Scientific Reports*, 13(1), 22650. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48144-y>
- [6]. Batayneh, M., Marie, I., & Asi, I. (2007). Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste Management*, 27(12), 1870–1876. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>
- [7]. Chithambar Ganesh, A., Deepak, N., Deepak, V., Ajay, S., Pandian, A., & Karthik. (2021). Utilization of PET bottles and plastic granules in geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 42, 444–449. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.170>
- [8]. da Luz Garcia, M., Oliveira, M. R., Silva, T. N., & Castro, A. C. M. (2021). Performance of mortars with PET. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(2), 699–706. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01160-w>
- [9]. Gondal, A. H., Bhat, R. A., Gómez, R. L., Areche, F. O., & Huaman, J. T. (2023). Advances in plastic pollution prevention and their fragile effects on soil, water, and air continuums. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6897–6912. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04607-9>

- [10]. Hacini, M., Benosman, A. S., Kazi Tani, N., Mouli, M., Senhadji, Y., Badache, A., & Latroch, N. (2021). Utilization and assessment of recycled polyethylene terephthalate strapping bands as lightweight aggregates in Eco-efficient composite mortars. *Construction and Building Materials*, 270, 121427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121427>
- [11]. Hama, S. M., & Hilal, N. N. (2017). Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 299–308. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2017.01.001>
- [12]. Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312–2320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>
- [13]. Islam, M. J., & Shahjalal, M. (2021). Effect of polypropylene plastic on concrete properties as a partial replacement of stone and brick aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00627. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00627>
- [14]. Jain, D., Bhadauria, S. S., & Kushwah, S. S. (2023). An experimental study of utilization of plastic waste for manufacturing of composite construction material. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(8), 8829–8838. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04447-7>
- [15]. Kavitha, S. A., Priya, R. K., Arunachalam, K. P., Avudaiappan, S., Saavedra Flores, E. I., & Blanco, D. (2024). Experimental investigation on strengthening of Zea mays root fibres for biodegradable composite materials using potassium permanganate treatment. *Scientific Reports*, 14(1), 12754. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58913-y>
- [16]. Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., & Fini, E. H. (2022). Sustainable construction via novel geopolymer composites incorporating waste plastic of different sizes and shapes. *Construction and Building Materials*, 324, 126697. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126697>
- [17]. Majeed, A. Z., Kurian, T., Davis, B., Alex, S. T., Fernandez, K. S., & Mathew, A. V. (2019). Partial Replacement of Aggregates with Granulated Waste Plastic in Solid Concrete Blocks---An Intensive Study. In H. Drück, R. G. Pillai, M. G. Tharian, & A. Z. Majeed (Eds.), *Green Buildings and Sustainable Engineering* (pp. 405–415). Springer Singapore.
- [18]. Marzouk, O. Y., Dheilily, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, 27(2), 310–318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- [19]. Naderi, M., & Kaboudan, A. (2021). Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability. *Journal of Building Engineering*, 37, 101928. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101928>
- [20]. Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- [21]. Ohemeng, E. A., & Ekol, S. O. (2019). Strength prediction model for cement mortar made with waste LDPE plastic as fine aggregate. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(4), 228–243. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1625826>
- [22]. Pacheco-Torgal, F. (2019). Introduction to the use of recycled plastics in eco-efficient concrete. In *Use of recycled plastics in eco-efficient concrete* (pp. 1–8). Elsevier.
- [23]. Patil, A., Jayale, V., Arunachalam, K. P., Ansari, K., Avudaiappan, S., Agrawal, D., Kuthe, A. M., Alharbi, Y. R., Amir Khan, M., & Roco-Videla, Á. (2024). Performance Analysis of Self-Compacting Concrete with Use of Artificial Aggregate and Partial Replacement of Cement by Fly Ash. *Buildings*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/buildings14010143>
- [24]. Prakash, K., Jane, A., & Henderson, H. (2023). Experimental Study on Mechanical Strength of Vibro - Compacted Interlocking Concrete Blocks Using Image Processing and Microstructural Analysis. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01194-8>
- [25]. Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., & Maallem, M. (2013). The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. *Construction and Building*

Materials, 43, 436–442.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>

[26]. Shaikh, F. U. A. (2020). Tensile and flexural behaviour of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibre reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 245, 118438.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118438>

[27]. Sim, J., & Park, C. (2011). Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. *Waste Management*, 31(11), 2352–2360.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>

[28]. Simão, L., Fernandes, E., Hotza, D., Ribeiro, M. J., Montedo, O. R. K., & Raupp-Pereira, F. (2021). Controlling efflorescence in geopolymers: A new approach. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00740.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00740>

[29]. Skariah Thomas, B., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S. N., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Hamada, H. M. (2022). Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, 3, 100056.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100056>

[30]. Sun, K., Peng, X., Wang, S., Zeng, L., Ran, P., & Ji, G. (2020). Effect of nano-SiO₂ on the efflorescence of an alkali-activated metakaolin mortar. *Construction and Building Materials*, 253, 118952.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118952>

[31]. Zega, C. J., & Di Maio, Á. A. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31(11), 2336–2340.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.011>

[32]. Zhang, C., Hu, M., van der Meide, M., Di Maio, F., Yang, X., Gao, X., Li, K., Zhao, H., & Li, C. (2023). Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. *Waste Management*, 155, 311–319.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.035>