

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Análisis del mortero con adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas y fibras de polipropileno en el comportamiento mecánico estructural de muros de albañilería

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autores:

Dario Jhenner Chavez Cusi
Junior Alex Gómez Mamani

Asesor:

Mg. Lily Zea Gonzales

Juliaca, agosto de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Lily Zea Gonzales, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **"ANÁLISIS DEL MORTERO CON ADICIÓN DE FIBRAS DE TEREFALATO DE POLIETILENO (PET) RECICLADAS Y FIBRAS DE POLIPROPILENO EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO ESTRUCTURAL DE MUROS DE ALBAÑILERÍA"** de los autores Dario Jhenner Chavez Cusi y Junior Alex Gómez Mamani tiene un índice de similitud de 19 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 18 días del mes de agosto del año 2026.



Mg. Lily Zea Gonzales

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 13 día(s) del mes de agosto del año 2026, siendo las 17:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección de la

(de la) presidente(a):

Ing Ferrer Ganoza Rojas

el (la) secretario(a): Dt. Edwin Parillo Becerra

y los demás miembros: Mg. Percy Freddy Quilla Coila

y el (la) asesor(a) Mg. Lily Lea Gonzales

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Análisis del mortero con adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET), recicladas y fibras de polipropileno en el comportamiento mecánico estructural de muros de albañilería

del(los) bachiller(es): a) Juniór Alex Gómez Mamani

b) Dario Thonner Chavez Cusi

c)

conducente a la obtención del título profesional de:

Ingeniero Civil

(Designación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Juniór Alex Gómez Mamani

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>14</u>	<u>C</u>	<u>Aceptable</u>	<u>Bueno</u>

Bachiller (b): Dario Thonner Chavez Cusi

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>14</u>	<u>C</u>	<u>Aceptable</u>	<u>Bueno</u>

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
Presidente/a
[Firma]
Asesor(a)
[Firma]
Bachiller (a)

[Firma]
Miembro
[Firma]
Bachiller (b)

[Firma]
Secretario/a

Miembro

Bachiller (c)

INDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
2.1. Materiales	7
2.2. Diseño experimental y dosificaciones	8
2.3. Elaboración de especímenes	9
2.4. Ensayos mecánicos.....	10
2.5. Análisis estadístico	10
3. RESULTADOS Y DISCUSION	10
3.1. Resistencia a compresión del mortero	10
3.2. Resistencia a flexión del mortero	13
3.3. Resistencia a compresión axial de pilas de albañilería	15
3.4. Resistencia al cizallamiento de las juntas de mortero	18
3.5. Resistencia a compresión diagonal de muretes de albañilería	20
3.5.1. Grupo 1.....	21
3.5.2. Grupo 2.....	22
3.5.3. Discusión de los resultados de la compresión diagonal.....	23
3.6. Análisis comparativo de los resultados	24
4. IMPLICACIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS Y APLICACIÓN PRÁCTICA	24
5. CONCLUSIONES	25
6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	26
REFERENCIAS.....	27
ANEXO A: Análisis económico de las fibras PET recicladas y fibras de polipropileno	29
A.1. Costos de los materiales empleados	29
A.2. Producción y costo de las fibras PET recicladas	29
A.3. Comparación económica entre fibras PET recicladas y fibras de polipropileno	29
A.4. Relación técnico–económica de las mezclas con mejor desempeño	30
ANEXOS SEGÚN ESTRUCTURA DE TESIS EN FORMATO ARTÍCULO:	31
ANEXO 1: Evidencia de sumisión del artículo	31
ANEXO 2: Resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo.....	32

Análisis del mortero con adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas y fibras de polipropileno en el comportamiento mecánico estructural de muros de albañilería

Analysis of mortar incorporating recycled polyethylene terephthalate (PET) fibers and polypropylene fibers on the mechanical behavior of structural masonry walls

D. Chávez ^{a*}, J. Gómez ^{b*}

a. Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión (Juliaca, Perú)

b. Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Peruana Unión (Juliaca, Perú)

*: jhenner.chavez11@gmail.com

*: junior.gomez@upeu.edu.pe

RESUMEN: La acumulación de residuos de tereftalato de polietileno (PET) ha impulsado el desarrollo de alternativas para su aprovechamiento en materiales de construcción. El objetivo fue analizar la influencia de fibras PET recicladas y fibras de polipropileno sobre el comportamiento mecánico estructural de muros de albañilería. Se realizó un estudio experimental con fibras PET de 10 y 20 mm y fibras de polipropileno en dosificaciones de 0.05%, 0.10% y 0.15%, evaluando la resistencia a compresión y flexión del mortero, la compresión axial de pilas, el cizallamiento de juntas y la compresión diagonal de muretes. Las fibras PET de 20 mm presentaron el mejor desempeño en el mortero y las pilas, mientras que las fibras de polipropileno alcanzaron la mayor resistencia al cizallamiento. Estos resultados sugieren que la eficacia del refuerzo depende del mecanismo resistente evaluado. Se concluye que las fibras PET recicladas constituyen una alternativa técnicamente viable para la albañilería estructural.

PALABRAS CLAVE: fibras PET recicladas; fibras de polipropileno; mortero reforzado con fibras; albañilería estructural; elementos de albañilería

ABSTRACT: The accumulation of polyethylene terephthalate (PET) waste has promoted the development of alternative applications in construction materials. This study aimed to analyze the influence of recycled PET fibers and polypropylene fibers on the structural mechanical behavior of masonry walls. An experimental program was conducted using 10 and 20 mm recycled PET fibers and polypropylene fibers at dosages of 0.05%, 0.10%, and 0.15%. Compressive and flexural strength of mortar, axial compressive strength of masonry prisms, shear strength of mortar joints, and diagonal compressive strength of masonry wallets were evaluated. The 20 mm recycled PET fibers showed the best performance in mortar and masonry prisms, whereas polypropylene fibers achieved the highest shear strength. These findings indicate that the effectiveness of fiber reinforcement depends on the prevailing resistance mechanism. Recycled PET fibers constitute a technically viable alternative for structural masonry applications.

KEYWORDS: recycled PET fibers; polypropylene fibers; fiber-reinforced mortar; structural masonry; masonry elements

ORCID ID: D. Chávez (<https://orcid.org/0000-0001-8221-9118>); J. Gómez (<https://orcid.org/0000-0001-8757-3685>)

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la producción y el consumo de plásticos han aumentado de forma sostenida, mientras que las tasas de reciclaje continúan siendo reducidas, favoreciendo la acumulación de residuos en vertederos y ecosistemas terrestres y acuáticos (1–4). Entre estos materiales, el tereftalato de polietileno (PET) constituye uno de los polímeros de mayor consumo debido a su amplio empleo en envases para bebidas, lo que ha incrementado el interés por desarrollar alternativas que permitan su aprovechamiento en nuevos materiales.

En el Perú, la limitada gestión de residuos sólidos ha contribuido a la acumulación de botellas PET en diferentes ciudades, incluyendo la cuenca del lago Titicaca, donde este tipo de residuo representa una problemática ambiental creciente (5–12). En este contexto, la incorporación de fibras PET recicladas en matrices cementicias ha surgido como una alternativa para valorizar estos residuos y evaluar su potencial como material de refuerzo en aplicaciones de ingeniería civil.

Diversas investigaciones han evaluado la incorporación de fibras poliméricas en materiales cementicios con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas y controlar el desarrollo de fisuras. En particular, las fibras PET recicladas han demostrado incrementar la resistencia a flexión, mejorar la tenacidad y contribuir al control de la fisuración cuando se emplean dosificaciones moderadas. No obstante, su influencia sobre la resistencia a compresión continúa mostrando resultados variables, dependiendo de factores como la longitud de la fibra, la dosificación incorporada y las características de la matriz cementicia (13–24).

Por otra parte, las fibras de polipropileno se han utilizado ampliamente como refuerzo secundario en morteros y concretos debido a su capacidad para limitar la propagación de fisuras y mejorar el comportamiento posterior al agrietamiento. Asimismo, diferentes investigaciones han reportado mejoras en la adherencia entre el mortero y las unidades de albañilería, así como incrementos en la

resistencia al corte y en la capacidad de disipación de energía (25–31).

Aunque diversos estudios han demostrado que las fibras PET recicladas y las fibras de polipropileno pueden mejorar determinadas propiedades mecánicas de materiales cementicios, la mayoría de las investigaciones ha evaluado ambos refuerzos de forma independiente o se ha centrado únicamente en ensayos sobre morteros. En consecuencia, aún es limitada la evidencia experimental que compare directamente ambos tipos de fibras bajo un mismo programa experimental y que analice su influencia sobre diferentes mecanismos resistentes de sistemas de albañilería, incluyendo la resistencia a compresión y flexión del mortero, la compresión axial de pilas, el cizallamiento de juntas y la compresión diagonal de muretes.

En este contexto, el presente estudio aporta una evaluación comparativa de fibras PET recicladas y fibras de polipropileno incorporadas independientemente en morteros de albañilería, analizando su influencia sobre distintos mecanismos resistentes dentro de un mismo programa experimental. Este enfoque permite establecer criterios técnicos para seleccionar el tipo de refuerzo en función de la sollicitación mecánica predominante, contribuyendo al conocimiento sobre el empleo de fibras poliméricas recicladas en aplicaciones de albañilería estructural.

A diferencia de estudios previos, esta investigación compara bajo un mismo diseño experimental dos tipos de fibras poliméricas evaluando simultáneamente propiedades del mortero y de elementos estructurales de albañilería.

El objetivo de esta investigación fue analizar la influencia de la incorporación independiente de fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas y fibras de polipropileno sobre el comportamiento mecánico estructural de sistemas de albañilería, mediante la evaluación de las propiedades mecánicas del mortero, la compresión axial de pilas, el cizallamiento de juntas y la compresión diagonal de muretes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Los materiales empleados en la investigación fueron cemento Portland, agregado fino, agua potable, unidades de albañilería de arcilla industrializada, fibras PET recicladas y fibras comerciales de polipropileno. Estos materiales fueron seleccionados por su uso habitual en sistemas de albañilería estructural y por su pertinencia para evaluar el efecto del refuerzo fibroso sobre las propiedades mecánicas del mortero y de los elementos de albañilería.

Se utilizó cemento Portland Rumi Tipo IP, el cual cumple con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 334.090 para cementos Portland adicionados. Las principales propiedades físicas y químicas del cemento se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas y composición química del cemento Portland Rumi Tipo IP utilizado en la investigación.

Químicos			
Óxido de magnesio (MgO) (%)	Trióxido de azufre (SO ₃) (%)	Pérdida de ignición (%)	
1.5 a 3.0	1.5 a 3.0	1.5 a 4.0	
Físicos			
Densidad	Contracción / Expansión en autoclave	Tiempo de fraguado inicial Vicat	Contenido de aire
g/cm ³	%	minutos	%
2.7 a 2.8	-0.09 a 0.05	140 a 260	3 a 8

Fuente: Elaboración propia con base en la ficha técnica del fabricante.

Como agregado fino se utilizó arena gruesa natural proveniente del río Maravillas, ubicado en la salida Cusco de la ciudad de Juliaca. El agregado fino cumplió con los requisitos granulométricos establecidos en la Norma Técnica Peruana E.070 y la norma ASTM C144 para morteros de albañilería. La distribución granulométrica del agregado fino se presenta en la Tabla 2. Asimismo, se empleó

agua potable libre de sustancias que pudieran afectar el proceso de hidratación del cemento.

Tabla 2. Granulometría de la arena

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA
N°4	100.00
N°8	82.60
N°16	61.40
N°30	37.45
N°50	16.46
N°100	4.65
N°200	2.78
FONDO	0.00

Fuente: Elaboración propia.

Las unidades de albañilería utilizadas correspondieron a ladrillos mecanizados King Kong Hércules 10, fabricados por la empresa Ladrillera el Diamante, con dimensiones nominales de 10 × 14 × 24 cm y 17 perforaciones. Estas unidades cumplen con las especificaciones establecidas en las Normas Técnicas Peruanas NTP 331.017 y NTP 399.613, así como con los requisitos del Reglamento Nacional de Edificaciones E.070 para albañilería.

Tabla 3. Propiedades físicas de las unidades de albañilería empleadas en la investigación.

Propiedad	Valor
Denominación comercial	King Kong Hércules 10
Clasificación (RNE E.070)	Tipo IV
Dimensiones nominales (cm)	10 × 14 × 24
Peso (kg)	3.00 – 3.25
Rendimiento (unid/m ²)	34.1
Absorción máxima (%)	22
Alabeo máximo (mm)	4
Resistencia mínima a compresión (kg/cm ²)	130

Fuente: Elaboración propia con base en la ficha técnica de Ladrillera el Diamante.

Las fibras PET recicladas se obtuvieron a partir de botellas posconsumo, las cuales fueron lavadas, acondicionadas y cortadas manualmente hasta obtener fibras con longitudes nominales de 10 mm y 20 mm, un ancho aproximado de 2 mm y un espesor

comprendido entre 0.45 y 0.55 mm. La Figura 1 muestra el proceso de obtención y las características geométricas de las fibras empleadas como refuerzo del mortero.

Las longitudes nominales de 10 mm y 20 mm fueron seleccionadas con base en antecedentes experimentales que han evaluado diferentes longitudes de fibras PET recicladas en materiales cementicios. Sabireen et al. (2023) emplearon fibras PET de 5, 10, 20 y 50 mm, mientras que Zerig et al. (2023) evaluaron longitudes de 10, 15, 25 y 35 mm. Asimismo, Ranjan et al. (2023) estudiaron fibras de 10, 25, 40 y 50 mm en morteros para mampostería. En función de estos antecedentes, se seleccionaron 10 y 20 mm para comparar el efecto de la longitud de la fibra sobre el comportamiento mecánico del mortero y los elementos de albañilería, manteniendo constantes las demás variables experimentales.

Figura 1. Obtención y caracterización dimensional de las fibras PET recicladas empleadas como refuerzo del mortero: (a) obtención de tiras a partir de botellas PET; (b) fibras de 10 mm y 20 mm de longitud; (c) medición del ancho promedio de 2 mm.



Fuente: Elaboración propia.

Como material de comparación se emplearon fibras comerciales de polipropileno, seleccionadas por su amplio uso como refuerzo secundario en morteros y concretos. Las características físicas de estas fibras se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características físicas y mecánicas de las fibras de polipropileno empleadas en la investigación.

Propiedad	Valor
Producto comercial	CHEMA Fibra Ultrafina
Material	Polipropileno 100 % virgen
Diseño	Filamento monolaminar
Color	Blanquecino translúcido
Gravedad específica	0.91 g/cm ³
Longitud nominal	13 mm y 19 mm
Resistencia a la tensión	480 MPa
Módulo de elasticidad	4.48 GPa
Punto de fusión	160 °C
Absorción de agua	Nula

Fuente: Elaboración propia con base en la ficha técnica de CHEMA Fibra Ultrafina.

Las fibras PET recicladas y las fibras de polipropileno fueron incorporadas al mortero conforme a las dosificaciones establecidas en el programa experimental, descrito en el apartado 2.2

2.2. Diseño experimental y dosificaciones

El programa experimental se diseñó para evaluar la influencia del tipo de fibra y de la dosificación sobre las propiedades mecánicas del mortero y de los elementos de albañilería. Para ello, se consideraron como variables independientes el tipo de fibra (PET reciclada de 10 mm, PET reciclada de 20 mm y polipropileno) y la dosificación (0.05%, 0.10% y 0.15% respecto al peso del mortero). Como variables dependientes se evaluaron la resistencia a compresión y flexión del mortero, la compresión axial de pilas, el cizallamiento de juntas y la compresión diagonal de muretes.

Se evaluaron diez tratamientos experimentales, constituidos por un mortero patrón sin incorporación de fibras y nueve mezclas reforzadas, obtenidas mediante la combinación de tres tipos de fibra y tres dosificaciones. La identificación de los tratamientos experimentales se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Tratamientos experimentales evaluados

Tratamiento	Refuerzo	Dosificación (%)
T0	Sin fibra	0.00%
T1	PET 10 mm	0.05%
T2	PET 10 mm	0.10%
T3	PET 10 mm	0.15%
T4	PET 20 mm	0.05%
T5	PET 20 mm	0.10%
T6	PET 20 mm	0.15%
T7	PP	0.05%
T8	PP	0.10%
T9	PP	0.15%

Fuente: Elaboración propia.

Cada tratamiento fue evaluado mediante especímenes elaborados conforme a las normas técnicas correspondientes para cada ensayo. Se prepararon tres especímenes por tratamiento para la determinación de la resistencia a compresión y flexión del mortero, la compresión axial de pilas, el cizallamiento de juntas y la compresión diagonal de muretes. El número de especímenes evaluados por tratamiento respondió a los requerimientos establecidos en las normas técnicas aplicables y a la práctica experimental ampliamente utilizada en investigaciones sobre morteros y albañilería estructural. Asimismo, la aplicación de pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas y análisis de varianza permitió verificar la consistencia estadística de los resultados obtenidos para las comparaciones entre tratamientos.

A pesar del número reducido de especímenes por tratamiento, los tamaños del efecto (η^2) obtenidos evidenciaron diferencias importantes entre tratamientos, respaldando la capacidad del diseño experimental para detectar los efectos asociados a la incorporación de fibras.

Figura 2. Esquema del diseño experimental y del programa de ensayos.



Fuente: Elaboración propia.

2.3. Elaboración de especímenes

Los especímenes fueron elaborados en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Peruana Unión, siguiendo un procedimiento uniforme para todos los tratamientos experimentales. La mezcla base se preparó con una proporción cemento:arena de 1:3 y una relación agua/cemento de 0.50. Posteriormente, las fibras PET recicladas y las fibras de polipropileno se incorporaron de manera independiente durante el proceso de mezclado, asegurando una distribución homogénea dentro de la matriz cementicia.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas del mortero se elaboraron probetas cúbicas de $5 \times 5 \times 5$ cm para los ensayos de resistencia a compresión y prismas de $4 \times 4 \times 16$ cm para los ensayos de resistencia a flexión. Adicionalmente, se construyeron pilas de albañilería, especímenes para el ensayo de cizallamiento de juntas y muretes destinados al ensayo de compresión diagonal, empleando en todos los casos el mortero correspondiente a cada tratamiento experimental.

Después del moldeo, los especímenes fueron sometidos a un proceso de curado durante 28 días antes de la realización de los ensayos mecánicos. Las probetas de mortero se curaron

mediante inmersión en agua, mientras que las pilas, juntas y muretes fueron almacenados bajo condiciones controladas hasta la edad de ensayo.

2.4. Ensayos mecánicos

Las propiedades mecánicas del mortero y de los elementos de albañilería se evaluaron mediante ensayos de resistencia a compresión y flexión del mortero, compresión axial de pilas, cizallamiento de juntas y compresión diagonal de muretes. Los ensayos se realizaron a los 28 días de curado conforme a las normas técnicas correspondientes. En todos los casos se registró la carga máxima alcanzada para determinar la resistencia mecánica de cada espécimen. La Tabla 6 resume los ensayos realizados, las normas aplicadas y los especímenes evaluados.

Tabla 6. Ensayos mecánicos realizados

Ensayo	Norma	Especímen
Compresión del mortero	ASTM C109/C109M	Cubo (5 × 5 × 5 cm)
Flexión del mortero	ASTM C348	Prisma (4 × 4 × 16 cm)
Compresión axial de pilas	RNE E.070	Pila de albañilería
Cizallamiento de juntas	NCh 167.Of2001	Junta de mortero
Compresión diagonal de muretes	ASTM E519	Murete (65 × 65 cm)

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Análisis estadístico

Los datos experimentales fueron analizados mediante estadística descriptiva, calculándose las medias e intervalos de confianza al 95% para cada tratamiento experimental. Previamente a la comparación entre grupos, se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para evaluar el efecto de la dosificación en cada tipo de fibra. Cuando se identificaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), se realizó la prueba de comparaciones múltiples

HSD de Tukey. Asimismo, se determinó el tamaño del efecto mediante el estadístico η^2 (eta cuadrado). Todos los análisis se realizaron con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$) utilizando el software IBM SPSS Statistics versión 31.

La magnitud del efecto se interpretó mediante el estadístico η^2 para complementar la significancia estadística y estimar la relevancia práctica de las diferencias observadas entre tratamientos.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Resistencia a compresión del mortero

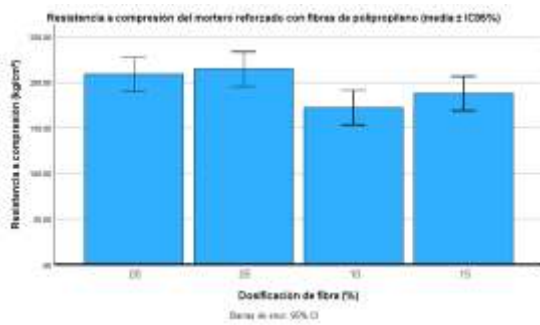
La Tabla 7 y las Figuras 3, 4 y 5 presentan la resistencia promedio a compresión del mortero a los 28 días para las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno (PP), fibras PET recicladas de 20 mm y fibras PET recicladas de 10 mm. Los valores corresponden a la media de tres especímenes por tratamiento y se presentan con intervalos de confianza al 95%.

Tabla 7. Resistencia promedio a compresión del mortero a los 28 días.

Tipo de fibra	Dosificación (%)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
Patrón	0.00	208.73
PP	0.05	214.43
PP	0.10	172.20
PP	0.15	187.67
PET 20 mm	0.05	240.93
PET 20 mm	0.10	126.00
PET 20 mm	0.15	153.73
PET 10 mm	0.05	123.07
PET 10 mm	0.10	127.27
PET 10 mm	0.15	152.00

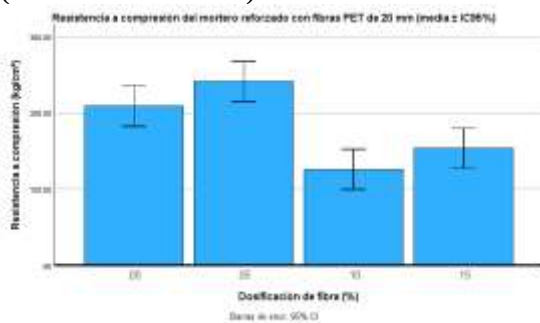
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Resistencia a compresión del mortero reforzado con fibras de polipropileno (media ± IC del 95%).



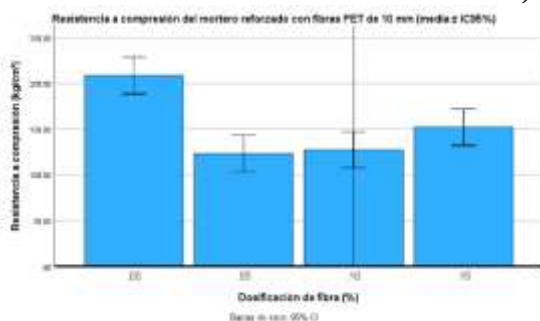
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Resistencia a compresión del mortero reforzado con fibras PET de 20 mm (media $\pm$ IC del 95%).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Resistencia a compresión del mortero reforzado con fibras PET de 10 mm (media $\pm$ IC del 95%).-



Fuente: Elaboración propia.

En las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno, la dosificación de 0.05% registró la mayor resistencia a compresión (214.43 kg/cm²), superando ligeramente al mortero patrón (208.73 kg/cm²). Al incrementar la incorporación de fibra a 0.10% y 0.15%, la resistencia disminuyó a 172.20 kg/cm² y 187.67 kg/cm², respectivamente. Este comportamiento indica que bajas dosificaciones favorecen el control de microfisuras y la redistribución de esfuerzos dentro de la matriz cementicia; sin embargo, contenidos más elevados pueden afectar la

homogeneidad de la mezcla y dificultar su compactación.

Las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 20 mm alcanzaron el mejor desempeño a compresión entre todos los tratamientos evaluados. La dosificación de 0.05% registró una resistencia de 240.93 kg/cm², equivalente a un incremento del 15.43% respecto al mortero patrón. En contraste, las dosificaciones de 0.10% y 0.15% redujeron la resistencia a 126.00 kg/cm² y 153.73 kg/cm², respectivamente. Este comportamiento sugiere que, en bajas proporciones, la longitud de 20 mm favoreció la transferencia de esfuerzos y el mecanismo de puenteo de fisuras reportado en la literatura. En cambio, un mayor contenido de fibra probablemente dificultó su dispersión, originando concentraciones locales y una distribución menos uniforme dentro de la matriz cementicia, con la consecuente disminución de la resistencia a compresión.

Las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 10 mm presentaron resistencias inferiores al mortero patrón en todas las dosificaciones evaluadas. Los valores obtenidos fueron 123.07 kg/cm², 127.27 kg/cm² y 152.00 kg/cm² para las incorporaciones de 0.05%, 0.10% y 0.15%, respectivamente. Esta respuesta puede atribuirse a que la menor longitud de la fibra limitó su capacidad de anclaje dentro de la matriz cementicia, reduciendo la eficiencia en la transferencia de esfuerzos. Además, la mayor amplitud de los intervalos de confianza, especialmente en la dosificación de 0.10%, evidencia una mayor dispersión entre especímenes y sugiere una interacción menos uniforme entre el refuerzo y la matriz.

En términos generales, los resultados sugieren que la respuesta a compresión estuvo condicionada tanto por la longitud como por la dosificación de la fibra. Las fibras PET recicladas de 20 mm presentaron el mejor desempeño, alcanzando la mayor resistencia con la incorporación del 0.05%, mientras que las fibras PET de 10 mm redujeron la resistencia en todas las dosificaciones

evaluadas. Por su parte, las fibras de polipropileno solo mejoraron la resistencia con una incorporación del 0.05%, lo que confirma que la eficacia del material de refuerzo depende de la interacción entre la geometría de la fibra, su contenido y su adecuada dispersión dentro de la matriz cementicia.

Tabla 8. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a compresión.

Tipo de fibra	F (gl=3,8)	p	η^2
PP	5.682	0.022	0.681
PET 20 mm	20.574	<0.001	0.885
PET 10 mm	20.777	<0.001	0.886

Fuente: Elaboración propia.

Antes de aplicar el análisis de varianza se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. Los resultados de Shapiro–Wilk indicaron que no se rechazó el supuesto de normalidad en los tratamientos evaluados, mientras que la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$), permitiendo la aplicación del ANOVA de una vía. El análisis evidenció diferencias estadísticamente significativas entre las dosificaciones evaluadas para las fibras de polipropileno ($F(3,8) = 5.682$; $p = 0.022$; $\eta^2 = 0.681$), PET de 20 mm ($F(3,8) = 20.574$; $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.885$) y PET de 10 mm ($F(3,8) = 20.777$; $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.886$), confirmando la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados para la resistencia a compresión del mortero. Posteriormente, la prueba HSD de Tukey indicó que las diferencias significativas estuvieron asociadas principalmente con la mezcla reforzada con fibras PET de 20 mm al 0.05%, mientras que las demás dosificaciones conformaron subconjuntos homogéneos.

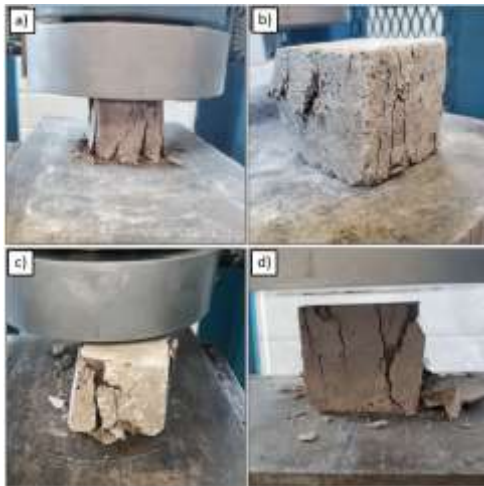
Estos resultados son consistentes con lo reportado por Zerig et al. (2023) y Peng et al. (2023), quienes señalaron que la incorporación de fibras sintéticas en bajas proporciones favorece la transferencia de esfuerzos y mejora la resistencia del mortero. En la presente investigación, este comportamiento fue más

evidente con las fibras PET recicladas de 20 mm, cuya incorporación al 0.05% produjo la mayor resistencia a compresión entre todos los tratamientos evaluados. Esta coincidencia sugiere que el comportamiento del sistema reforzado depende de la interacción entre la geometría de la fibra, la dosificación incorporada y su adecuada dispersión dentro de la matriz cementicia. Por el contrario, al incrementar el contenido de fibra se observó una disminución de la resistencia, probablemente asociada a una distribución menos uniforme del refuerzo y a la formación de zonas localizadas de concentración, fenómeno descrito también en investigaciones previas sobre morteros reforzados con fibras sintéticas.

En conjunto, los resultados demuestran que la incorporación de fibras PET recicladas de 20 mm mejora significativamente la resistencia a compresión del mortero cuando se emplean bajas dosificaciones, mientras que incrementos adicionales del contenido de fibra reducen dicha ventaja debido a problemas de dispersión y compactación de la mezcla.

Los modos de falla observados fueron consistentes con los resultados mecánicos obtenidos. El mortero patrón presentó una fractura frágil con propagación rápida de las fisuras, mientras que las mezclas reforzadas evidenciaron una mayor continuidad del material después del agrietamiento inicial, atribuible al mecanismo de puenteo de fisuras descrito para este tipo de fibras. Este comportamiento fue más evidente en las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 20 mm, en concordancia con los mayores valores de resistencia a compresión registrados.

Figura 6. Modos de falla observados en los ensayos de resistencia a compresión del mortero: a) mortero patrón, b) mortero reforzado con fibras de polipropileno, c) mortero reforzado con fibras PET de 10 mm y d) mortero reforzado con fibras PET de 20 mm.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Resistencia a flexión del mortero

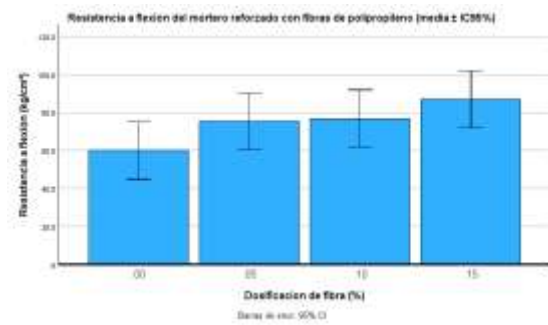
La Tabla 9 y las Figuras 7, 8 y 9 presentan la resistencia promedio a flexión a los 28 días para las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno (PP), fibras PET recicladas de 20 mm y fibras PET recicladas de 10 mm. Los valores corresponden a la media de tres especímenes por tratamiento y se presentan con intervalos de confianza al 95%.

Tabla 9. Resistencia promedio a flexión del mortero a los 28 días

Tipo de fibra	Dosificación (%)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
Patrón	0.00	60.00
PP	0.05	86.94
PP	0.10	86.08
PP	0.15	94.12
PET 20 mm	0.05	108.20
PET 20 mm	0.10	110.07
PET 20 mm	0.15	109.50
PET 10 mm	0.05	77.27
PET 10 mm	0.10	71.27
PET 10 mm	0.15	85.93

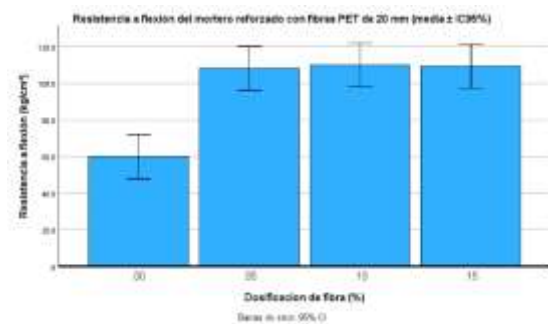
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Resistencia a flexión del mortero reforzado con fibras de polipropileno (media $\pm$ IC del 95%)



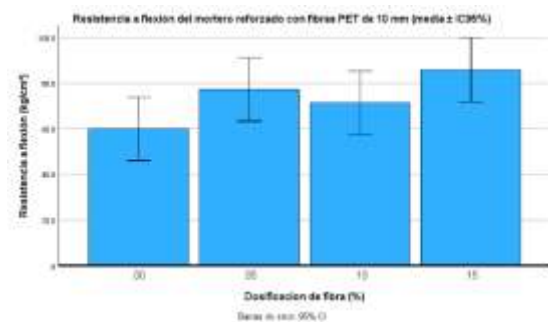
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Resistencia a flexión del mortero reforzado con fibras PET de 20 mm (media $\pm$ IC del 95%)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Resistencia a flexión del mortero reforzado con fibras PET de 10 mm (media $\pm$ IC del 95%)



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 9, todas las mezclas reforzadas superaron la resistencia a flexión del mortero patrón (60.00 kg/cm²). En las mezclas con fibras de polipropileno, la resistencia aumentó conforme se incrementó la dosificación, alcanzando un máximo de 94.12 kg/cm² con la incorporación del 0.15%, equivalente a un incremento del 56.9% respecto al patrón. Esta respuesta sugiere que las fibras actuaron como elementos de puenteo de fisuras reportado en la literatura, limitando

el desarrollo de fisuras y favoreciendo una redistribución más eficiente de los esfuerzos de tracción dentro de la matriz cementicia.

Las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 20 mm presentaron el mejor desempeño en flexión entre todos los tratamientos evaluados. La mayor resistencia se obtuvo con la dosificación de 0.10%, alcanzando 110.07 kg/cm², equivalente a un incremento del 83.45% respecto al mortero patrón. Este resultado sugiere que la longitud de 20 mm favoreció un mecanismo eficiente de anclaje y un comportamiento consistente con el mecanismo de puenteo de fisuras reportado en la literatura, incrementando la capacidad del material para transferir esfuerzos de tracción después del inicio del agrietamiento.

Aunque las tres dosificaciones presentaron resistencias muy próximas entre sí, el ANOVA y la prueba HSD de Tukey confirmaron diferencias estadísticamente significativas respecto al tratamiento patrón, evidenciando la efectividad del refuerzo independientemente de la ligera variación entre dosificaciones.

Las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 10 mm también mejoraron la resistencia a flexión respecto al mortero patrón, alcanzando valores comprendidos entre 71.27 kg/cm² y 85.93 kg/cm². No obstante, las mejoras fueron inferiores a las obtenidas con las fibras PET recicladas de 20 mm y con las fibras de polipropileno. Esta respuesta puede atribuirse a la menor longitud de anclaje, que habría limitado la eficiencia del mecanismo de puenteo de fisuras descrito para este tipo de fibras y, en consecuencia, la capacidad del material para transferir esfuerzos de tracción durante la apertura progresiva de las grietas.

En conjunto, los resultados sugieren que la incorporación de fibras mejoró la respuesta a flexión del mortero respecto al tratamiento patrón, aunque la magnitud del efecto dependió del tipo de fibra y de la dosificación empleada. Las fibras PET recicladas de 20 mm presentaron el mejor desempeño global, con incrementos superiores al 80%, mientras que las fibras PET de 10 mm mostraron mejoras

más moderadas. Por su parte, las fibras de polipropileno incrementaron progresivamente la resistencia conforme aumentó la dosificación.

Tabla 10. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a flexión

Tipo de fibra	F (gl=3,8)	p	η^2
PP	2.925	0.100	0.523
PET 20 mm	22.138	< 0.001	0.892
PET 10 mm	3.214	0.083	0.546

Fuente: Elaboración propia.

Antes de aplicar el análisis de varianza se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. En todos los tratamientos, los valores obtenidos con Shapiro–Wilk fueron superiores a 0.05, por lo que no se rechazó el supuesto de normalidad. Asimismo, la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$), respaldando la aplicación del ANOVA de una vía. El análisis mostró diferencias estadísticamente significativas únicamente para las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 20 mm ($F(3,8) = 22.138$; $p < 0.001$; $\eta^2 = 0.892$), confirmando la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados para la resistencia a flexión del mortero. En contraste, las fibras de polipropileno ($F(3,8) = 2.925$; $p = 0.100$; $\eta^2 = 0.523$) y las fibras PET recicladas de 10 mm ($F(3,8) = 3.214$; $p = 0.083$; $\eta^2 = 0.546$) no presentaron diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95%; sin embargo, los tamaños del efecto indican una influencia moderada del tratamiento sobre la variabilidad observada.

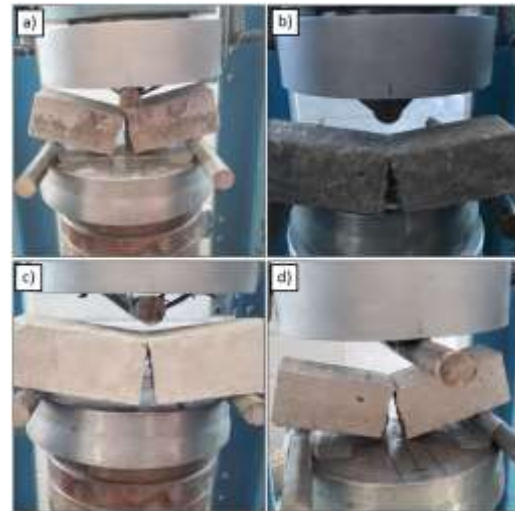
La prueba HSD de Tukey indicó que las diferencias significativas estuvieron asociadas principalmente al contraste entre el mortero patrón y las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 20 mm. Asimismo, las tres dosificaciones evaluadas conformaron un subconjunto homogéneo, lo que indica que cualquiera de ellas permitió mejorar significativamente la resistencia a flexión respecto al tratamiento patrón.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado por Zerig et al. (2023) y Ranjan et al. (2023), quienes observaron mejoras en la resistencia a flexión de morteros y elementos de albañilería reforzados con fibras sintéticas. En la presente investigación, este comportamiento fue más evidente con las fibras PET recicladas de 20 mm, cuya incorporación permitió alcanzar la mayor resistencia flexional entre todos los tratamientos evaluados. Esta coincidencia sugiere que una mayor longitud efectiva favorece el comportamiento que puede atribuirse al mecanismo de puenteo de fisuras descrito para este tipo de fibras y la transferencia de esfuerzos de tracción a través de la matriz cementicia después del inicio del agrietamiento. En conjunto, estos resultados evidencian que el desempeño del sistema de refuerzo depende no solo del material utilizado, sino también de la geometría de la fibra y de la dosificación incorporada, factores que condicionan la capacidad del mortero para mantener su resistencia una vez iniciada la fisuración.

En términos generales, los resultados sugieren que la incorporación de fibras PET recicladas de 20 mm constituye la alternativa más eficiente para incrementar la resistencia a flexión del mortero dentro del rango de dosificaciones evaluado, evidenciando que la longitud de la fibra desempeña un papel determinante en el mecanismo de refuerzo por puenteo de fisuras.

Los modos de falla observados fueron consistentes con los resultados obtenidos en los ensayos de flexión. El mortero patrón presentó una fractura frágil con propagación rápida de la grieta principal, mientras que las mezclas reforzadas mostraron una mayor integridad después del agrietamiento inicial, atribuible al mecanismo de puenteo de fisuras desarrollado por las fibras. Este comportamiento fue más evidente en las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 20 mm, en concordancia con los mayores valores de resistencia a flexión registrados.

Figura 10. Modos de falla observados en los ensayos de resistencia a flexión del mortero: a) mortero patrón, b) mortero reforzado con fibras de polipropileno, c) mortero reforzado con fibras PET de 10 mm y d) mortero reforzado con fibras PET de 20 mm.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Resistencia a compresión axial de pilas de albañilería

La Tabla 11 y las Figuras 11, 12 y 13 presentan la resistencia promedio a compresión axial de las pilas de albañilería a los 28 días para las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno (PP), fibras PET recicladas de 20 mm y fibras PET recicladas de 10 mm. Los valores corresponden a la media de tres especímenes por tratamiento y se presentan con intervalos de confianza al 95% permitiendo evaluar la variabilidad experimental entre las mezclas estudiadas.

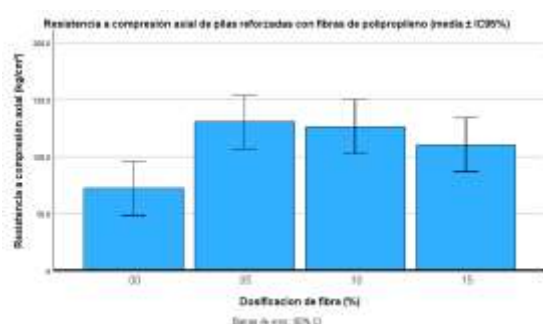
Tabla 11. Resistencia promedio a compresión axial de pilas de albañilería a los 28 días

Tipo de fibra	Dosificación (%)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
Patrón	0.00	72.10
PP	0.05	130.43
PP	0.10	126.27
PP	0.15	110.23
PET 20 mm	0.05	118.07
PET 20 mm	0.10	135.40
PET 20 mm	0.15	123.03

PET 10 mm	0.05	59.63
PET 10 mm	0.10	95.70
PET 10 mm	0.15	116.03

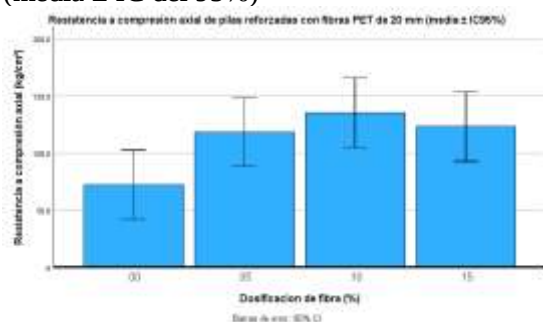
Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Resistencia a compresión axial de pilas reforzadas con fibras de polipropileno (media $\pm$ IC del 95%)



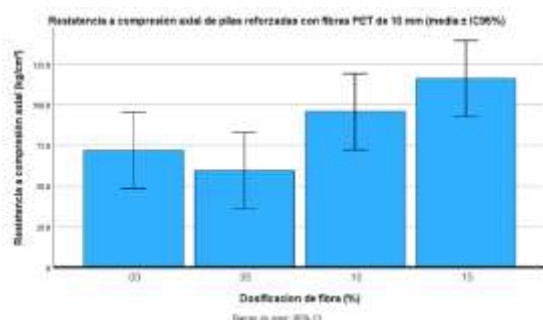
Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Resistencia a compresión axial de pilas reforzadas con fibras PET de 20 mm (media $\pm$ IC del 95%)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Resistencia a compresión axial de pilas reforzadas con fibras PET de 10 mm (media $\pm$ IC del 95%)



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 11 muestran que la incorporación de fibras modificó la resistencia a compresión axial de las pilas respecto al

tratamiento patrón. En las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno, la mayor resistencia se obtuvo con la dosificación de 0.05%, alcanzando 130.43 kg/cm², equivalente a un incremento del 80.9% respecto a la pila patrón. Las dosificaciones de 0.10% y 0.15% registraron resistencias de 126.27 kg/cm² y 110.23 kg/cm², respectivamente, aunque mantuvieron valores superiores al tratamiento de referencia.

La mayor resistencia a compresión axial de toda la investigación se obtuvo con las fibras PET recicladas de 20 mm incorporadas en una dosificación del 0.10%, alcanzando 135.40 kg/cm², equivalente a un incremento del 87.8% respecto a la pila patrón. Las dosificaciones de 0.05% y 0.15% registraron resistencias de 118.07 kg/cm² y 123.03 kg/cm², respectivamente, manteniéndose también por encima del tratamiento de referencia.

Por el contrario, las fibras PET recicladas de 10 mm mostraron una respuesta dependiente de la dosificación. La incorporación del 0.05% registró una resistencia de 59.63 kg/cm², inferior a la obtenida en la pila patrón. Sin embargo, al incrementar el contenido de fibra hasta 0.10% y 0.15%, la resistencia aumentó progresivamente a 95.70 kg/cm² y 116.03 kg/cm², respectivamente.

En conjunto, los resultados sugieren que la incorporación de fibras incrementó la capacidad resistente de las pilas de albañilería, aunque la magnitud del efecto dependió del tipo de fibra y de la dosificación empleada. Las fibras PET recicladas de 20 mm alcanzaron el mejor desempeño con la incorporación del 0.10%, mientras que las fibras PET de 10 mm presentaron una respuesta más sensible al contenido de fibra. Estos resultados indican que la mejora observada en las propiedades del mortero no se transfiere automáticamente al elemento estructural, sino que depende de la interacción entre las juntas de mortero reforzado y las unidades de albañilería durante la transmisión de cargas.

Las Figuras 11, 12 y 13 muestran que la menor amplitud de los intervalos de confianza

observada en los tratamientos con mejor desempeño indica una respuesta experimental más uniforme entre los especímenes ensayados. En las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno, las dosificaciones de 0.05% y 0.10% presentaron los mayores valores medios, mientras que las fibras PET recicladas de 20 mm alcanzaron su mejor desempeño con la incorporación del 0.10%. En contraste, las fibras PET recicladas de 10 mm mostraron una mayor dispersión, especialmente con la dosificación de 0.05%, lo que sugiere una respuesta menos uniforme del elemento estructural.

Tabla 12. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a compresión axial de pilas de albañilería

Tipo de fibra	F (gl=3,8)	p	η^2
PP	6.701	0.014	0.715
PET 20 mm	4.439	0.041	0.625
PET 10 mm	6.084	0.018	0.695

Fuente: Elaboración propia.

Antes de aplicar el análisis de varianza se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. En todos los tratamientos, los valores obtenidos con Shapiro–Wilk fueron superiores a 0.05, por lo que no se rechazó el supuesto de normalidad. Asimismo, la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$), respaldando la aplicación del ANOVA de una vía. El análisis mostró diferencias estadísticamente significativas entre las dosificaciones evaluadas para las fibras de polipropileno ($F(3,8) = 6.701$; $p = 0.014$; $\eta^2 = 0.715$), PET recicladas de 20 mm ($F(3,8) = 4.439$; $p = 0.041$; $\eta^2 = 0.625$) y PET recicladas de 10 mm ($F(3,8) = 6.084$; $p = 0.018$; $\eta^2 = 0.695$), confirmando la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados en la resistencia a compresión axial de las pilas de albañilería. Los tamaños del efecto obtenidos evidencian que esta influencia fue considerable en los tres tipos de fibra evaluados.

La prueba HSD de Tukey indicó que las principales diferencias estuvieron asociadas al contraste entre el tratamiento patrón y las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno y PET recicladas de 20 mm. En las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas de 10 mm, la resistencia aumentó progresivamente con la dosificación, siendo la incorporación del 0.15% la que presentó el desempeño más favorable dentro de este grupo.

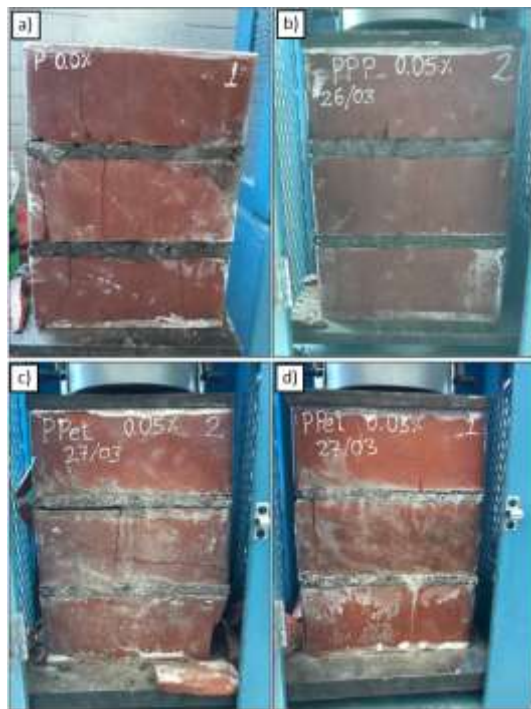
Estos resultados son consistentes con lo reportado por Ranjan et al. (2023), quienes observaron incrementos en la capacidad resistente de elementos de albañilería reforzados con fibras PET. En la presente investigación, este comportamiento fue más evidente con las fibras PET recicladas de 20 mm incorporadas al 0.10%, tratamiento que alcanzó la mayor resistencia a compresión axial entre todas las pilas evaluadas. Esta coincidencia sugiere que una mayor longitud efectiva de la fibra favorece la transferencia de esfuerzos entre el mortero reforzado y las unidades de albañilería, mejorando la capacidad resistente del conjunto estructural.

Los resultados también sugieren que la mejora de las propiedades mecánicas del mortero no implica necesariamente una respuesta equivalente del elemento estructural, ya que el desempeño de las pilas depende además de la interacción entre las juntas de mortero, las unidades de albañilería y el mecanismo de transmisión de cargas. En este contexto, las fibras PET recicladas de 20 mm proporcionaron la respuesta estructural más favorable, mientras que las fibras PET recicladas de 10 mm mostraron una mayor dependencia de la dosificación empleada. Estos hallazgos confirman que contribución mecánica de las fibras está determinada no solo por las características de la fibra, sino también por su contribución a la interacción entre los componentes del sistema de albañilería.

Los modos de falla observados fueron consistentes con los resultados obtenidos en los ensayos de compresión axial de las pilas de albañilería. La falla se caracterizó principalmente por el desarrollo de fisuras

verticales que atravesaron tanto las unidades de albañilería como las juntas de mortero, patrón característico de elementos sometidos a cargas de compresión axial. Las pilas reforzadas con fibras PET recicladas de 20 mm presentaron una respuesta más uniforme después del inicio de la fisuración, en concordancia con los mayores valores de resistencia registrados durante el ensayo.

Figura 14. Modos de falla observados en los ensayos de resistencia a compresión axial de pilas de albañilería: a) pila patrón, b) pila reforzada con fibras de polipropileno, c) pila reforzada con fibras PET de 10 mm y d) pila reforzada con fibras PET de 20 mm.



Fuente: Elaboración propia.

3.4. Resistencia al cizallamiento de las juntas de mortero

La Tabla 13 y las Figuras 15, 16 y 17 presentan la resistencia promedio al cizallamiento de las juntas de mortero a los 28 días para las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno (PP), fibras PET recicladas de 20 mm y fibras PET recicladas de 10 mm. Los valores corresponden a la media de tres especímenes por tratamiento y se presentan con intervalos de confianza al 95%.

Tabla 13. Resistencia promedio al cizallamiento de las juntas de mortero a los 28 días

Tipo de fibra	Dosificación (%)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
Patrón	0.00	5.10
PP	0.05	5.33
PP	0.10	7.93
PP	0.15	9.23
PET 20 mm	0.05	7.70
PET 20 mm	0.10	6.83
PET 20 mm	0.15	7.53
PET 10 mm	0.05	5.03
PET 10 mm	0.10	8.27
PET 10 mm	0.15	6.30

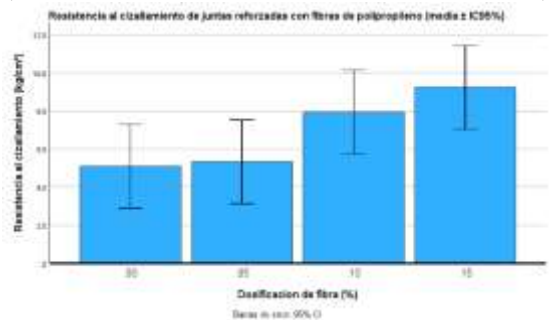
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 15, las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno presentaron un incremento progresivo de la resistencia al cizallamiento conforme aumentó la dosificación. La mayor resistencia se obtuvo con la incorporación del 0.15%, alcanzando 9.23 kg/cm², valor que representa un incremento del 81.0% respecto a la junta patrón. Las dosificaciones de 0.05% y 0.10% también mejoraron la resistencia al corte, aunque en menor magnitud.

Las mezclas reforzadas con fibras PET recicladas también incrementaron la resistencia al cizallamiento respecto a la junta patrón, aunque con una respuesta dependiente de la longitud y la dosificación incorporada. En las fibras PET de 20 mm, la mayor resistencia se obtuvo con la dosificación de 0.05%, alcanzando 7.70 kg/cm², equivalente a un incremento del 50.98% respecto al patrón. Por su parte, las fibras PET de 10 mm alcanzaron su mejor desempeño con la dosificación de 0.10%, registrando una resistencia de 8.27 kg/cm², lo que representa una mejora del 62.16%. Aunque estos valores evidencian una contribución favorable del refuerzo, ninguno superó la resistencia alcanzada por las fibras de polipropileno al 0.15%.

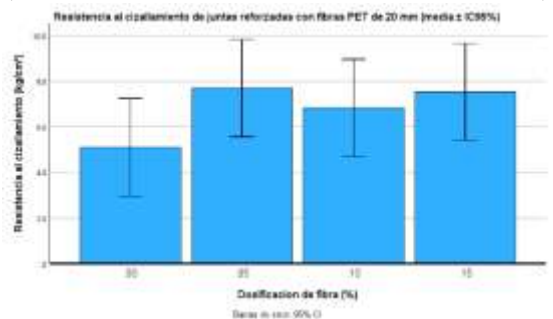
En conjunto, los resultados sugieren que la resistencia al cizallamiento dependió del tipo de fibra y de la dosificación incorporada. Mientras las fibras PET recicladas de 20 mm presentaron el mejor desempeño en los ensayos de compresión y flexión, las fibras de polipropileno alcanzaron la mayor resistencia al corte.

Figura 15. Resistencia al cizallamiento de juntas reforzadas con fibras de polipropileno (media $\pm$ IC del 95%)



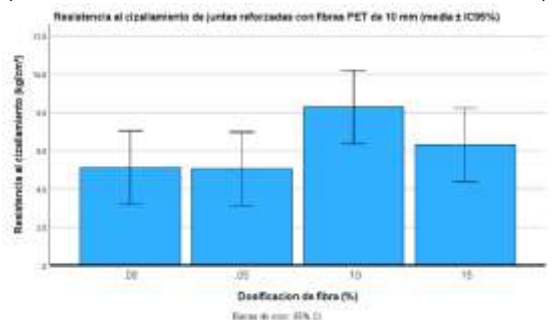
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Resistencia al cizallamiento de juntas reforzadas con fibras PET de 20 mm (media $\pm$ IC del 95%)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Resistencia al cizallamiento de juntas reforzadas con fibras PET de 10 mm (media $\pm$ IC del 95%)



Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 15, 16 y 17 muestran las medias marginales estimadas y sus respectivos intervalos de confianza al 95%. En las mezclas reforzadas con polipropileno se aprecia una tendencia creciente de la resistencia al aumentar la dosificación de fibra, alcanzando el máximo desempeño con 0.15%. En contraste, las fibras PET presentaron comportamientos menos uniformes, observándose incrementos y reducciones dependiendo de la longitud y porcentaje incorporado.

Con respecto a los intervalos de confianza, las mezclas con fibras PET mostraron una mayor superposición entre tratamientos, lo que sugiere una menor diferenciación entre tratamientos. Por el contrario, las mezclas reforzadas con polipropileno presentaron una tendencia más definida hacia el incremento de la resistencia al cizallamiento. La menor superposición observada en las mezclas reforzadas con polipropileno coincide con la mayor diferenciación estadística obtenida posteriormente mediante el análisis de varianza.

Tabla 14. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia al cizallamiento

Tipo de fibra	F (gl=3,8)	p	η^2
PP	4.480	0.040	0.627
PET 20 mm	1.648	0.254	0.382
PET 10 mm	3.255	0.081	0.550

Fuente: Elaboración propia.

Previamente a la aplicación del análisis de varianza se verificaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro–Wilk y de homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene. En todos los tratamientos los valores obtenidos mediante Shapiro–Wilk fueron superiores a 0.05, indicando que no se rechazó el supuesto de normalidad, mientras que la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas ($p>0.05$), justificando la aplicación del ANOVA de una vía. El análisis de varianza de una vía mostró diferencias estadísticamente significativas únicamente para las fibras de polipropileno ($F(3,8)=4.480$; $p=0.040$;

$\eta^2=0.627$), evidenciando diferencias significativas entre los tratamientos evaluados en la resistencia al cizallamiento de las juntas de mortero. En contraste, las fibras PET de 20 mm ($F(3,8)=1.648$; $p=0.254$; $\eta^2=0.382$) y PET de 10 mm ($F(3,8)=3.255$; $p=0.081$; $\eta^2=0.550$) no presentaron diferencias estadísticamente significativas al nivel de confianza del 95%, aunque los tamaños de efecto obtenidos sugieren una influencia moderada del tratamiento sobre la variabilidad observada. Estos resultados indican que el efecto de la dosificación fue más consistente en las mezclas reforzadas con fibras de polipropileno que en aquellas reforzadas con fibras PET.

La prueba HSD de Tukey mostró que las diferencias significativas estuvieron asociadas principalmente a la dosificación de polipropileno al 0.15%, la cual presentó diferencias significativas respecto al tratamiento patrón, mientras que las mezclas reforzadas con fibras PET conformaron subconjuntos homogéneos sin diferencias estadísticas entre dosificaciones.

Los resultados son consistentes con lo reportado por Ranjan et al. (2023), quienes señalaron que la incorporación de fibras PET mejora la resistencia de adherencia y la capacidad de transferencia de esfuerzos en juntas de mampostería. Asimismo, el mejor desempeño alcanzado por las fibras de polipropileno coincide con los hallazgos de Berrios et al. (2023), quienes reportaron mejoras significativas en la adherencia mortero-ladrillo mediante la incorporación de fibras sintéticas.

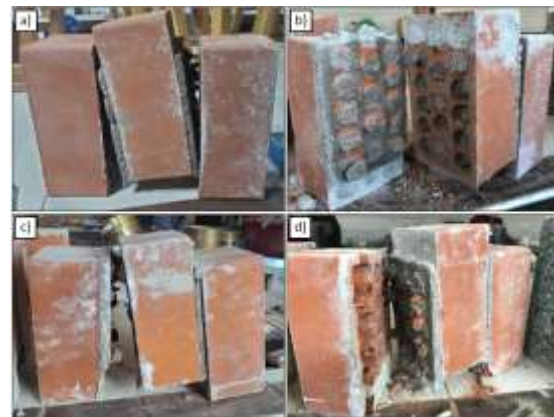
En la presente investigación se observó que las fibras PET recicladas de 20 mm alcanzaron el mejor desempeño en los ensayos de compresión y flexión, mientras que las fibras de polipropileno presentaron la mayor resistencia al cizallamiento. Esta diferencia indica que la eficiencia del refuerzo depende del mecanismo resistente predominante en cada ensayo y no únicamente del tipo de fibra empleado. En consecuencia, la respuesta de las juntas de mortero estuvo condicionada por la interacción entre la geometría de la fibra, la

dosificación incorporada y la transferencia de esfuerzos en la interfaz mortero-ladrillo.

Desde el punto de vista mecánico, las fibras actúan como elementos de puenteo de fisuras que atraviesan las microfisuras generadas en la interfaz mortero-ladrillo, retardando su propagación y favoreciendo una redistribución más uniforme de los esfuerzos cortantes. Este mecanismo mejora la adherencia entre el mortero y las unidades de albañilería, retrasando la pérdida de resistencia una vez iniciado el proceso de fisuración.

Los modos de falla observados fueron consistentes con los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia al cizallamiento. La falla se caracterizó principalmente por el deslizamiento y la fisuración en la interfaz mortero-ladrillo, patrón característico de elementos sometidos a esfuerzos cortantes. Las juntas reforzadas con fibras de polipropileno mostraron un patrón de falla más uniforme, en concordancia con los mayores valores de resistencia al cizallamiento obtenidos durante el ensayo

Figura 18. Modos de falla observados en los ensayos de resistencia al cizallamiento de juntas de mortero: a) junta patrón, b) junta reforzada con fibras de polipropileno, c) junta reforzada con fibras PET de 10 mm y d) junta reforzada con fibras PET de 20 mm.



Fuente: Elaboración propia.

3.5. Resistencia a compresión diagonal de muretes de albañilería

La resistencia promedio a compresión diagonal de los muretes de albañilería se evaluó

mediante dos grupos experimentales. El Grupo 1 estuvo conformado por el tratamiento patrón, el mortero reforzado con fibras de polipropileno al 0.15% y las fibras PET recicladas de 10 mm al 0.15%, mientras que el Grupo 2 incluyó el tratamiento patrón, las fibras de polipropileno al 0.05% y las fibras PET recicladas de 20 mm al 0.05%. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 15 y 17 y en las Figuras 19 y 20.

3.5.1. Grupo 1

Tabla 15. Resistencia promedio a compresión diagonal de muretes de albañilería – Grupo 1

Tratamiento	Resistencia promedio (kg/cm ²)
Patrón	112.22
PP 0.15%	110.61
PET 10 mm 0.15%	71.5

Fuente: Elaboración propia.

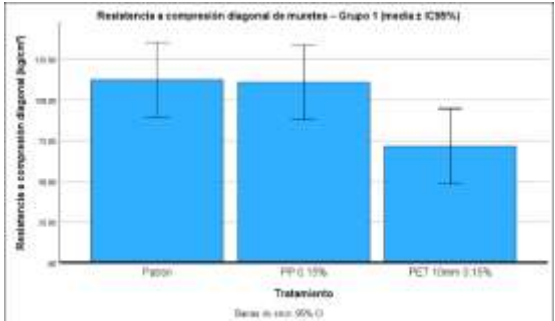
Los resultados obtenidos muestran que el murete patrón alcanzó una resistencia promedio de 112.22 kg/cm², mientras que el murete reforzado con fibras de polipropileno al 0.15% registró una resistencia de 110.61 kg/cm². La diferencia entre ambos tratamientos fue mínima, representando una disminución de apenas 1.44%.

Por otro lado, el murete reforzado con fibras PET de 10 mm al 0.15% presentó una resistencia promedio de 71.50 kg/cm², valor que representa una reducción aproximada de 36.3% respecto al murete patrón. Este comportamiento evidencia que la incorporación de fibras PET de corta longitud y elevada dosificación no favoreció la resistencia a compresión diagonal del sistema de albañilería bajo las condiciones estudiadas.

En términos generales, el refuerzo con fibras de polipropileno permitió conservar una resistencia a compresión diagonal prácticamente equivalente a la del murete patrón, mientras que las fibras PET de 10 mm al 0.15% produjo la mayor reducción de resistencia observada en este ensayo. Estos resultados evidencian que la respuesta del

sistema depende no solo del material de refuerzo, sino también de la geometría y dosificación de las fibras incorporadas.

Figura 19. Resistencia a compresión diagonal de muretes – Grupo 1 (media ± IC del 95%)



Fuente: Elaboración propia.

Los intervalos de confianza al 95% muestran una marcada superposición entre los tratamientos Patrón y PP 0.15%, confirmando la similitud observada en sus resistencias promedio. En contraste, el tratamiento PET 10 mm 0.15% presentó valores medios considerablemente menores, indicando una reducción importante en la capacidad resistente del murete.

Tabla 16. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a compresión diagonal – Grupo 1

Fuente	F (gl=2,6)	p	η ²
Grupo 1	5.966	0.037	0.665

Fuente: Elaboración propia.

La normalidad de los datos fue evaluada mediante la prueba de Shapiro–Wilk. Aunque el tratamiento patrón presentó una ligera desviación respecto a la distribución normal ($p = 0.019$), la prueba de Levene confirmó el cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas ($F = 0.565$; $p = 0.596$). Considerando el reducido tamaño muestral ($n = 3$ por tratamiento), la inspección de los gráficos Q–Q, el cumplimiento del supuesto de homogeneidad de varianzas y la robustez del ANOVA frente a leves desviaciones de normalidad justificaron la aplicación del análisis paramétrico. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados

($F(2,6) = 5.966$; $p = 0.037$; $\eta^2 = 0.665$), indicando que el tipo de refuerzo ejerció una influencia considerable sobre la resistencia a compresión diagonal de los muretes.

El análisis post hoc de Tukey mostró que las mayores diferencias se produjeron entre el tratamiento PET 10 mm 0.15% y los tratamientos Patrón y PP 0.15%, mientras que entre el Patrón y PP 0.15% no se identificaron diferencias relevantes. Estos resultados confirman que la disminución observada estuvo asociada específicamente a la incorporación de fibras PET de 10 mm al 0.15%, mientras que el comportamiento del sistema reforzado con polipropileno permaneció estadísticamente comparable al del patrón.

3.5.2. Grupo 2

Tabla 17. Resistencia promedio a compresión diagonal de muretes de albañilería – Grupo 2

Tratamiento	Resistencia promedio (kg/cm²)
Patrón	112.22
PP 0.05%	96.11
PET 20 mm 0.05%	95.57

Fuente: Elaboración propia.

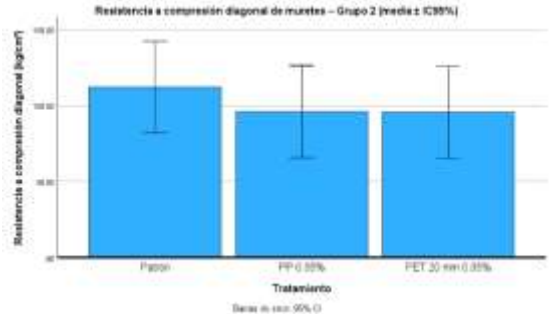
Los resultados sugieren que el murete patrón alcanzó nuevamente una resistencia promedio de 112.22 kg/cm². Los muretes reforzados con fibras de polipropileno al 0.05% y fibras PET de 20 mm al 0.05% registraron resistencias promedio de 96.11 kg/cm² y 95.57 kg/cm², respectivamente.

Comparados con el patrón, estos tratamientos presentaron reducciones de aproximadamente 14.4% y 14.8%, respectivamente. Sin embargo, la magnitud de dichas diferencias fue considerablemente menor que la observada en el Grupo 1 para las fibras PET de 10 mm.

En conjunto, los tratamientos evaluados en el Grupo 2 presentaron reducciones moderadas de resistencia respecto al patrón, sin evidenciar diferencias relevantes entre las fibras de polipropileno al 0.05% y las fibras PET

recicladas de 20 mm al 0.05%, resultado posteriormente corroborado por el análisis estadístico.

Figura 20. Resistencia a compresión diagonal de muretes – Grupo 2 (media ± IC del 95%).



Fuente: Elaboración propia.

Los intervalos de confianza al 95% muestran una amplia superposición entre los tres tratamientos evaluados, sugiriendo que las diferencias observadas podrían atribuirse a la variabilidad experimental más que al efecto de la incorporación de fibras.

Tabla 18. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia a compresión diagonal – Grupo 2

Fuente	F (gl=2,6)	p	η^2
Grupo 2	0.585	0.586	0.163

Fuente: Elaboración propia.

La prueba de Shapiro–Wilk indicó una ligera desviación de la normalidad para el tratamiento patrón ($p = 0.019$); sin embargo, la prueba de Levene confirmó la homogeneidad de varianzas ($F = 2.335$; $p = 0.178$), por lo que se consideró apropiada la aplicación del análisis de varianza. El ANOVA no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($F(2,6) = 0.585$; $p = 0.586$; $\eta^2 = 0.163$), indicando que las variaciones observadas en las resistencias promedio no fueron suficientes para atribuirse al efecto de las fibras incorporadas.

Los resultados de la prueba de Tukey tampoco identificaron diferencias significativas entre ninguno de los tratamientos analizados, corroborando que el comportamiento

mecánico de los tres grupos fue estadísticamente similar.

3.5.3. Discusión de los resultados de la compresión diagonal

Los resultados muestran que la incorporación de fibras no produjo incrementos generalizados en la resistencia diagonal de los muretes.

En el Grupo 1, las fibras de polipropileno al 0.15% mantuvieron una resistencia prácticamente equivalente al patrón, mientras que las fibras PET de 10 mm al 0.15% generaron una disminución significativa de la capacidad resistente. En el Grupo 2, tanto las fibras de polipropileno al 0.05% como las fibras PET de 20 mm al 0.05% presentaron resistencias ligeramente inferiores al patrón, aunque sin diferencias estadísticamente significativas.

Estos resultados coinciden parcialmente con lo reportado por Ranjan et al. (2023), quienes señalaron que la incorporación de fibras PET puede mejorar determinadas propiedades mecánicas de elementos de mampostería; sin embargo, dichos beneficios no necesariamente se traducen en incrementos de la resistencia a compresión diagonal cuando la longitud y la dosificación de las fibras no favorecen una adecuada interacción con la matriz cementicia. Asimismo, el comportamiento observado para las fibras de polipropileno resulta consistente con lo reportado por Fernandez Berrios et al. (2023), quienes destacaron su capacidad para mejorar la adherencia y controlar la propagación de fisuras sin afectar significativamente la resistencia del sistema.

Asimismo, los resultados sugieren que la influencia de las fibras depende del mecanismo resistente evaluado. Mientras las fibras PET recicladas mostraron un desempeño favorable en los ensayos de compresión del mortero y de pilas, dicho comportamiento no se reprodujo en la compresión diagonal de los muretes. Esto indica que la respuesta estructural de los sistemas de albañilería está gobernada por la interacción entre las unidades, las juntas de mortero y la transferencia de esfuerzos

cortantes, mecanismos cuya complejidad supera la observada en ensayos realizados sobre el mortero de forma aislada.

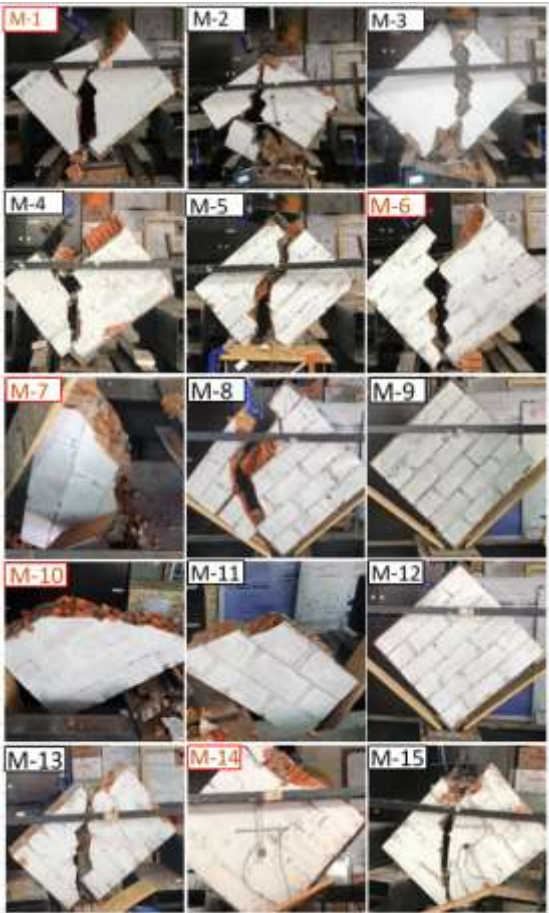
Bajo las condiciones experimentales evaluadas, las fibras PET recicladas no incrementaron la resistencia a compresión diagonal de los muretes. Sin embargo, este resultado no implica un comportamiento estructural desfavorable, ya que las fibras pueden contribuir al control de fisuración y a la capacidad de absorción de energía, aspectos que no fueron evaluados en el presente estudio.

Estos resultados permiten establecer que el tratamiento reforzado con fibras de polipropileno al 0.15% presentó el comportamiento más favorable entre los sistemas reforzados, al conservar una resistencia diagonal prácticamente equivalente a la del murete patrón. Estos resultados confirman que la influencia de las fibras sobre la resistencia a compresión diagonal depende no solo del material utilizado, sino también de la longitud y de la dosificación incorporadas al mortero.

En conjunto, los resultados obtenidos en los diferentes ensayos confirman que la eficacia de las fibras recicladas PET y de las fibras de polipropileno depende del mecanismo resistente evaluado, por lo que la selección del tipo de refuerzo debe realizarse en función del mecanismo resistente o de la sollicitación mecánica predominante del sistema de albañilería.

Los modos de falla observados fueron consistentes con los resultados obtenidos en los ensayos de compresión diagonal. La fisuración se desarrolló predominantemente en dirección diagonal a través de las unidades de albañilería y las juntas de mortero, patrón característico de elementos sometidos a esfuerzos cortantes combinados con compresión. Los muretes reforzados con fibras de polipropileno mostraron un patrón de fisuración similar al del murete patrón, en concordancia con las resistencias registradas durante el ensayo.

Figura 21. Modos de falla observados durante los ensayos de resistencia a compresión diagonal en muretes de albañilería reforzados con fibras de polipropileno, PET de 10 mm y PET de 20 mm.



Fuente: Elaboración propia.

3.6. Análisis comparativo de los resultados

Los resultados evidencian que la respuesta del mortero reforzado dependió del tipo, longitud y dosificación de la fibra. Las fibras PET de 20 mm mostraron el mejor comportamiento global en compresión y flexión, resultado consistente con Zerig et al. (2023) y Ranjan et al. (2023), quienes reportaron que la longitud de las fibras PET influye en el desempeño mecánico y la adherencia de morteros para mampostería. Asimismo, Sabireen et al. (2023) y Pereira De Oliveira y Castro-Gomes (2011) señalaron que las características de las fibras PET recicladas condicionan la respuesta de la matriz cementicia. En las fibras de polipropileno, el incremento de la resistencia dependió de la propiedad evaluada y de la dosificación,

comportamiento comparable con lo reportado por Fernández Berrios y Ramírez Valdez (2023). En conjunto, la respuesta observada confirma que la eficiencia del refuerzo está condicionada por la interacción entre las características de la fibra y la matriz cementicia.

4. IMPLICACIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS Y APLICACIÓN PRÁCTICA

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de fibras poliméricas modifica el comportamiento mecánico de los sistemas de albañilería de forma diferenciada según el mecanismo resistente evaluado. Las fibras PET recicladas de 20 mm alcanzaron el mejor desempeño en la resistencia a compresión del mortero, la resistencia a flexión y la compresión axial de pilas, mientras que las fibras de polipropileno presentaron la mayor resistencia al cizallamiento de juntas. En la compresión diagonal de muretes no se observaron incrementos significativos respecto al tratamiento patrón, lo que confirma que la eficacia del material de refuerzo depende del tipo de sollicitación mecánica y del nivel estructural analizado. La consistencia de estos resultados también fue respaldada por el análisis estadístico realizado. Si bien el programa experimental consideró tres especímenes por tratamiento, los tamaños del efecto (η^2) obtenidos en los diferentes ensayos evidenciaron diferencias importantes entre las mezclas estudiadas, lo que confirma la capacidad del diseño experimental para detectar los efectos asociados a la incorporación de fibras.

Tabla 19. Comparación técnico–económica de las fibras evaluadas.

Fibra	Costo total (S/kg)	Mejor propiedad alcanzada	Incremento máximo (%)
PET reciclado	31.00	Compresión axial de pilas	+87.8%
Polipropileno	88.24	Cizallamiento	+81.0%

Fuente: Elaboración propia.

La comparación técnico-económica evidencia que las fibras PET recicladas constituyen la alternativa más competitiva dentro de las condiciones evaluadas. Aunque ambas fibras mejoraron determinadas propiedades mecánicas, las fibras PET recicladas alcanzaron los mayores incrementos en la resistencia a compresión del mortero, la resistencia a flexión y la compresión axial de pilas, utilizando un material cuyo costo de producción fue de S/ 31.00 por kilogramo. En contraste, las fibras de polipropileno presentaron un mejor desempeño frente al cizallamiento de juntas; sin embargo, su costo comercial alcanzó S/ 88.24 por kilogramo, aproximadamente 2.85 veces superior al costo estimado para las fibras PET recicladas.

Debe señalarse que el costo de producción de las fibras PET recicladas fue estimado considerando un proceso artesanal que incluyó la recolección de botellas posconsumo, limpieza, desinfección, corte manual y verificación dimensional. En consecuencia, la incorporación de procesos mecanizados o semiindustrializados podría reducir aún más los costos de producción, incrementar la uniformidad geométrica de las fibras y mejorar su competitividad para aplicaciones en sistemas de albañilería estructural.

Desde el punto de vista de la práctica profesional, los resultados indican que la selección del tipo de fibra no debe fundamentarse únicamente en la resistencia máxima alcanzada, sino en el mecanismo resistente predominante del elemento estructural. Las fibras PET recicladas de 20 mm constituyen una alternativa adecuada cuando se busca mejorar la resistencia a compresión del mortero y la capacidad resistente de pilas de albañilería, mientras que las fibras de polipropileno ofrecen ventajas para aplicaciones donde la resistencia al cizallamiento representa el mecanismo crítico. En consecuencia, la elección del refuerzo debe responder a criterios de desempeño estructural específicos y no a una única propiedad mecánica.

Además del comportamiento mecánico observado, la utilización de fibras PET

recicladas representa una alternativa para el aprovechamiento de botellas plásticas posconsumo mediante su incorporación como material de refuerzo en morteros de albañilería. Bajo las condiciones evaluadas, esta alternativa permitió obtener mejoras significativas en diversas propiedades mecánicas empleando un material de bajo costo obtenido a partir de residuos PET procesados mediante operaciones simples de limpieza y corte. En este contexto, los resultados obtenidos muestran que las fibras PET recicladas poseen potencial para aplicaciones en sistemas de albañilería, siempre que la selección del tipo de fibra y de la dosificación responda al mecanismo resistente predominante del elemento estructural.

El procedimiento detallado para la estimación de los costos de producción, así como el análisis económico comparativo desarrollado durante la investigación, se presentan en el Anexo A.

5. CONCLUSIONES

La incorporación independiente de fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas y fibras de polipropileno modificó las propiedades mecánicas del mortero y de los elementos de albañilería evaluados, confirmando que su influencia depende del tipo de fibra, su longitud y la dosificación empleada. Los resultados permitieron cumplir el objetivo de analizar la influencia de ambos materiales de refuerzo sobre el desempeño mecánico de sistemas de albañilería.

En los ensayos realizados sobre el mortero, las fibras PET recicladas de 20 mm presentaron el mejor desempeño global. La dosificación de 0.05% alcanzó la mayor resistencia a compresión (240.93 kg/cm²), mientras que la dosificación de 0.10% registró la mayor resistencia a flexión (110.07 kg/cm²). Estos resultados evidencian que la longitud y el contenido de fibra influyen directamente en la eficiencia del refuerzo y en la interacción con la matriz cementicia.

En los elementos estructurales, las fibras PET recicladas de 20 mm al 0.10% proporcionaron la mayor resistencia a compresión axial de

pilas (135.40 kg/cm²), equivalente a un incremento del 87.8% respecto al patrón. En contraste, las fibras de polipropileno presentaron el mejor desempeño frente a esfuerzos cortantes, alcanzando una resistencia al cizallamiento de juntas de 9.23 kg/cm² con la dosificación de 0.15%, correspondiente a un incremento del 81.0% respecto a la junta patrón.

En los ensayos de compresión diagonal, las fibras PET recicladas no incrementaron la resistencia de los muretes bajo las condiciones experimentales evaluadas. Sin embargo, las fibras de polipropileno conservaron una resistencia prácticamente equivalente a la del murete patrón, evidenciando que la respuesta del sistema de albañilería depende de la interacción entre las unidades, las juntas de mortero y el mecanismo de transferencia de esfuerzos.

En conjunto, los resultados demostraron que la eficiencia del refuerzo no depende únicamente del tipo de fibra, sino del mecanismo resistente predominante en cada ensayo. Mientras las fibras PET recicladas de 20 mm mostraron un mejor desempeño en compresión del mortero, flexión y compresión axial de pilas, las fibras de polipropileno fueron más eficientes frente a esfuerzos cortantes en las juntas de mortero y conservaron la resistencia a compresión diagonal de los muretes. Este comportamiento evidencia que la selección del refuerzo debe realizarse en función de la sollicitación mecánica predominante en el elemento estructural.

Finalmente, los resultados obtenidos demuestran que las fibras PET recicladas constituyen una alternativa técnicamente viable para el refuerzo de morteros destinados a elementos de albañilería. Asimismo, el presente estudio demuestra la posibilidad de incorporar residuos plásticos posconsumo como material de refuerzo en aplicaciones de ingeniería civil. Sin embargo, su implementación en proyectos a mayor escala requiere investigaciones complementarias sobre durabilidad y comportamiento estructural bajo condiciones de servicio antes de su implementación a mayor escala.

6. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Entre las principales limitaciones del presente estudio se encuentra la caracterización experimental de las fibras PET recicladas, la cual se restringió a sus propiedades geométricas (longitud, ancho, espesor y relación de aspecto). No fue posible determinar experimentalmente propiedades físicas y mecánicas como la resistencia a tracción, el módulo de elasticidad o la densidad, debido a las limitaciones de equipamiento disponibles. Asimismo, las fibras fueron obtenidas mediante el corte manual de botellas PET posconsumo previamente lavadas, desinfectadas y secadas, por lo que pueden existir ligeras variaciones geométricas inherentes al proceso de fabricación.

El programa experimental se limitó a dos longitudes de fibra (10 mm y 20 mm), tres dosificaciones (0.05%, 0.10% y 0.15%) y ensayos realizados a los 28 días de curado. Asimismo, se evaluó únicamente la incorporación independiente de fibras PET recicladas y fibras de polipropileno, sin considerar sistemas híbridos que combinen ambos tipos de refuerzo. Los costos estimados corresponden a condiciones de laboratorio y pequeña escala, por lo que podrían diferir de los obtenidos mediante procesos industrializados de producción.

La investigación se centró en la evaluación de la resistencia mecánica del mortero y de los elementos de albañilería bajo cargas estáticas. En consecuencia, no se analizaron propiedades posteriores a la fisuración, como la ductilidad, la tenacidad o la capacidad de absorción de energía, ni el comportamiento frente a cargas cíclicas o sísmicas.

Como futuras líneas de investigación, se recomienda ampliar la caracterización física y mecánica de las fibras PET recicladas, así como evaluar longitudes superiores a 20 mm, dosificaciones mayores al 0.15% y sistemas híbridos que combinen fibras PET recicladas y fibras de polipropileno. Del mismo modo, resulta pertinente desarrollar estudios sobre

durabilidad, ductilidad, tenacidad, absorción de energía y comportamiento bajo cargas cíclicas o sísmicas. Finalmente, se recomienda ampliar la investigación hacia sistemas estructurales de mayor escala, considerando diferentes condiciones de servicio y procedimientos de fabricación de las fibras.

Declaración de contribución de autoría

Darío J. Chávez C.: Conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, visualización, elaboración de figuras y tablas, redacción del borrador original.

Junior Gómez M.: Metodología, validación, investigación, análisis formal, interpretación de resultados, revisión crítica y edición del manuscrito.

Ambos autores participaron en la revisión integral del artículo, aprobaron la versión final para su publicación y asumen la responsabilidad del contenido científico del trabajo.

Declaración de intereses en conflicto

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses financieros, personales ni de otro tipo que pudieran haber influido de forma inapropiada en el desarrollo de la investigación, en los resultados obtenidos, en la interpretación de los datos o en la redacción de este manuscrito.

Asimismo, los autores declaran que el trabajo no ha sido enviado ni se encuentra en evaluación en otra revista científica y que todos los datos y resultados se presentan de forma honesta, completa y transparente, de acuerdo con las buenas prácticas de investigación y publicación.

REFERENCIAS

- (1) Waste Direct. (2025). Plastic waste statistics & trends (Updated 2026).
- (2) Plastics for Change. (2025, 23 de abril). Why is less than 10% of the world's plastic being recycled?
- (3) OECD. (2025, 20 de mayo). Stemming plastic pollution to protect the ocean.
- (4) Statista. (2025, 6 de marzo). Global plastic waste – Statistics and facts.
- (5) Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA). (2024). La contaminación por plásticos en el Perú: Reflexiones en torno al Acuerdo Global.
- (6) Ministerio del Ambiente. (2023, 31 de diciembre). Perú propone que acuerdo global contra la contaminación por plástico incluya acciones hacia el desarrollo sostenible. Gobierno del Perú – MINAM.
- (7) WWF & MINAM. (2025, 16 de diciembre). Peru presents Roadmap to 2040 to reduce plastic pollution. WWF Peru.
- (8) Huamaní Montesinos, C., Tudela Mamani, J. W., & Huamaní Peralta, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca (Puno, Perú). *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 106–116.
<https://doi.org/10.18271/ria.2020.533>
- (9) Universidad Nacional del Altiplano. (2021). Solid waste management of the city of Juliaca (Puno, Peru). Repositorio Alicia–CONCYTEC.
- (10) Infobae. (2025, 16 de julio). Contaminación en el Titicaca: peces con plástico, ríos con arsénico y comunidades que consumen agua no apta para la vida. Infobae Perú.
- (11) Latina Republic. (2023, 5 de noviembre). Bolivian and Peruvian universities join forces to cleanse Lake Titicaca. Latina Republic.
- (12) Cultural Survival. (2025, 26 de mayo). “Mama Qota is at risk”: Indigenous communities and defenders unite to save Lake Titicaca, La Paz and El Alto. Cultural Survival Quarterly.
- (13) Ministerio de Vivienda / SENCICO. (2016). Norma Técnica E.070 Albañilería.
- (14) Paredes, R. (2017). Análisis experimental de muros de albañilería confinada... Tesis PUCP.
- (15) Universidad Nacional Federico Villarreal. (2020). Evaluación estructural, propuesta de reforzamiento y ...

- (16) Evaluación de fallas estructurales en viviendas de albañilería... (2019). Tesis UCV.
- (17) INEI. (2018). Características de las viviendas particulares censadas – Censo 2017.
- (18) INEI. (2018). Puno – Resultados definitivos – Censo 2017.
- (19) MVCS. (2019). Norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente (D.S. 030-2019-VIVIENDA).
- (20) Villalobos, J. (2010). Diseño sísmico de edificaciones de albañilería confinada. PUCP.
- (21) Holland Circular Hotspot. (2021). Waste management in Peru: Market scan and business opportunities.
- (22) Rahman, M. U., & Li, J. (2023). Influence of Waste Filler on the Mechanical Properties and Microstructure of Epoxy Mortar. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(11).
<https://doi.org/10.3390/app13116857>
- (23) Zerig, T., Aidoud, A., Belachia, M., Djedid, T., & Abbas, M. (2023). Combined sand eco-mortar reinforced with polyethylene Terephthalate: Behavior and optimization using RSM method. *Construction and Building Materials*, 404.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133160>
- (24) Ranjan, N., Banerjee, S., Nayak, S., & Das, S. (2022). Efficacy of waste plastic towards enhancement of shear and flexure carrying capacity of masonry structures. *Journal of Cleaner Production*, 365.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132669>
- (25) Beibei, X., Devid, F., Carlo, M. G., Luciana, R., Fabio, D. T., & Andrea, F. G. (2021). Experimental Characterization of Mortar with Recycled PET Aggregate: Preliminary Results. *Procedia Structural Integrity*, 33(C), 1027-1034.
<https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2021.10.114>
- (26) Papán, D., Lapašová, L., & Papánová, Z. (2023). Hybrid Composite Materials Made of Recycled PET and Standard Polymer Blends Used in Civil Engineering. *Polymers*, 15(16).
<https://doi.org/10.3390/polym15163407>
- (27) Sabireen, Butt, F., Ahmad, A., Ullah, K., Zaid, O., Ahmed Shah, H., & Kamal, T. (2023). Mechanical performance of fiber-reinforced concrete and functionally graded concrete with natural and recycled aggregates. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(9).
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102121>
- (28) Ranjan, N., Banerjee, S., Nayak, S., & Das, S. (2023). Waste polyethylene terephthalate (PET) fiber reinforced mortar in enhancing the bond behavior of masonry. *Structures*, 53, 908-923.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.097>
- (29) Alshijlawi, M., Mahmoud Hama, S., Abdulhamed, M. A., Aidan, I. A., Rajab, N. A., & Hameed Fayyadh, A. (2026). Performance of Polypropylene Fiber-Reinforced Mortar Exposed to Elevated Temperatures. *F1000Research*, 15, 30.
<https://doi.org/10.12688/F1000RESEARCH.175541.1>
- (30) Fernandez Berrios, R. A., & Ramírez Valdez, D. A. (2023). Propuesta de diseño de un mortero adicionando fibras de polipropileno para mejorar la adherencia del mortero-ladrillo en muros de albañilería simple en la ciudad de Lima Metropolitana [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC.
<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/entities/publication/f1b133fc-b437-5b17-a11b-26ec7183e1ff>
- (31) Pereira De Oliveira, L. A., & Castro-Gomes, J. P. (2011). Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1712-1717.
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.11.044>

ANEXO A: Análisis económico de las fibras PET recicladas y fibras de polipropileno

A.1. Costos de los materiales empleados

Para el análisis económico se consideraron los costos reales de adquisición de los materiales empleados durante el desarrollo experimental. Los precios corresponden a valores de mercado vigentes durante el periodo de ejecución de la investigación.

Tabla A.1. Costos unitarios de los materiales utilizados

Material	Unidad	Precio (S/)
Cemento Portland Rumi Tipo IP	Bolsa 42.5 kg	25.5
Arena gruesa	m ³	90.0
Botellas PET recicladas	kg	1.0
Fibra de polipropileno CHEMA Fibra Ultrafina	340 g	30.0
Ladrillo King Kong Hércules 10	unidad	1.4

Fuente: Elaboración propia.

A.2. Producción y costo de las fibras PET recicladas

Las fibras PET utilizadas fueron obtenidas a partir de botellas plásticas posconsumo mediante un proceso artesanal que comprendió la recolección, clasificación, lavado, desinfección, secado y corte manual del material. Las fibras producidas presentaron longitudes nominales de 10 mm y 20 mm, con un ancho aproximado de 2 mm.

Durante el proceso experimental se determinó que la producción de 1 kg de fibras PET requirió aproximadamente tres horas de trabajo. Para estimar el costo de producción se consideró una remuneración equivalente a un ayudante de construcción civil.

Tabla A.2. Costo de producción de fibras PET recicladas

Concepto	Valor
Costo de botellas PET recicladas (S/kg)	1.00
Tiempo de producción (h/kg)	3.00
Costo de mano de obra (S/h)	10.00
Costo de mano de obra por kg (S/kg)	30.00
Costo total de producción PET (S/kg)	31.00

Fuente: Elaboración propia.

A.3. Comparación económica entre fibras PET recicladas y fibras de polipropileno

Para las fibras de polipropileno se consideró el precio comercial del producto utilizado durante la investigación.

Tabla A.3. Comparación económica de las fibras utilizadas.

Fibra	Costo unitario (S/kg)
PET reciclado	31.00
Polipropileno	88.24

Fuente: Elaboración propia.

La comparación evidencia que el costo de producción de las fibras PET recicladas fue aproximadamente 2.85 veces menor que el correspondiente a las fibras comerciales de polipropileno, de acuerdo con la siguiente relación:

$$88.24/31.00 = 2.85$$

Debe señalarse que el costo estimado para las fibras PET corresponde a un proceso artesanal de fabricación. La incorporación de procesos mecanizados o semiindustrializados podría reducir los costos de producción y mejorar la uniformidad geométrica de las fibras.

A.4. Relación técnico–económica de las mezclas con mejor desempeño

Con el propósito de complementar la evaluación económica, se compararon las mezclas que registraron los mejores resultados experimentales en cada propiedad mecánica.

Tabla A.4. Comparación técnico–económica de las mezclas con mejor desempeño mecánico.

Propiedad	Mezcla óptima	Variación (%)	Costo fibra (S/kg)
Compresión del mortero	PET 20 mm – 0.05%	+15.43	31.00
Flexión del mortero	PET 20 mm – 0.10%	+83.45	31.00
Compresión axial de pilas	PET 20 mm – 0.10%	+87.80	31.00
Cizallamiento de juntas	PP – 0.15%	+80.98	88.24
Compresión diagonal de muretes	PP – 0.15%	–1.43	88.24

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que las fibras PET recicladas de 20 mm alcanzaron los mayores incrementos en resistencia a compresión del mortero, resistencia a flexión y compresión axial de pilas utilizando el menor costo de producción entre los materiales evaluados. Por su parte, las fibras de polipropileno presentaron el mejor desempeño en la resistencia al cizallamiento de juntas; sin embargo, su costo unitario fue considerablemente mayor.

En conjunto, el análisis evidencia que, bajo las condiciones experimentales de esta investigación, las fibras PET recicladas constituyen la alternativa con la mejor relación técnico–económica, al proporcionar mejoras importantes en las propiedades mecánicas más relevantes empleando un material de menor costo que las fibras comerciales de polipropileno.

ANEXOS SEGÚN ESTRUCTURA DE TESIS EN FORMATO ARTÍCULO:

ANEXO 1: Evidencia de sumisión del artículo



dario jhenner chavez cusi <jhenner.chavez11@gmail.com>

[MC] Acuse de recibo del envío

Mar Alonso López via Materiales de la Construcción

7 de julio de 2026 a las

<administrador.revistas@csic.es>

12:44 a.m.

Responder a: Mar Alonso López <materconstrucc@ietcc.csic.es>

Para: DARIO JHENNER CHAVEZ CUSI <jhenner.chavez11@gmail.com>

DARIO JHENNER CHAVEZ CUSI:

Gracias por enviar el manuscrito "Análisis del mortero con adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas y fibras de polipropileno en el comportamiento mecánico estructural de muros de albañilería" a Materiales de Construcción. Con el sistema de gestión de publicaciones en línea que utilizamos podrá seguir el progreso a través del proceso editorial tras iniciar sesión en el sitio web de la publicación:

URL del manuscrito: <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/authorDashboard/submission/4589>

Nombre de usuario/a: jhenner22

Si tiene alguna duda puede ponerse en contacto conmigo. Gracias por elegir esta editorial para mostrar su trabajo.

Mar Alonso López

Eduardo Torroja Institute for Construction Sciences (IETCC-CSIC)

Editor-In-Chief of "Materiales de Construcción" Journal (JCR- 2022; I.F.: 2.100)

<https://materconstrucc.revistas.csic.es>

<https://www.ietcc.csic.es>

Follow us in Twitter at @MaterialesdeCo3

ANEXO 2: Resolución de inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo



“AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO”

RESOLUCIÓN N° 0736-2024/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Naña 24 de setiembre de 2024

VISTO:

El expediente de **Junior Alex Gómez Mamani**, identificado(a) con Código Universitario N° 201710550 y **Dario Jhenner Chavez Cusi** identificado(a) con Código Universitario N° 201422194, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Junior Alex Gómez Mamani** y **Dario Jhenner Chavez Cusi**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado “Análisis del mortero con adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas y fibras de polipropileno en el comportamiento mecánico estructural de muros de albañilería” y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

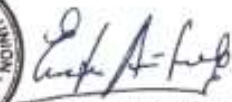
Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 24 de setiembre de 2024, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado “Análisis del mortero con adición de fibras de tereftalato de polietileno (PET) recicladas y fibras de polipropileno en el comportamiento mecánico estructural de muros de albañilería” y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar a **Mg. Lily Zea Gonzales** como ASESOR para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Mg. Edwin Parillo Escarsena** y **Mg. Percy Fredy Quilla Coila**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.




Dra. Erika Inés Acuña Salinas
DECANA




Ph.D. Silvia Pilco Quesada
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:
-Interesado
-Asesor
-Dirección General de Investigación
-Archivo