

3

Reforzamiento De Mampostería Con Mortero De Cemento Y Fibras..

*Masonry Reinforcement With Cement Mortar
And Fibers.*

Autores

Mabel Tatiana Villafuerte Vera

Ing. Civil Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

mvillafuerte2322@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0006-9460-4893>

Yordy Ivonne Mieles Bravo

Ing. Civil Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

yordy.mieles@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2864-2625>

Reforzamiento De Mampostería Con Mortero De Cemento Y Fibras..

Masonry Reinforcement With Cement Mortar And Fibers.

RESUMEN	ABSTRACT
<p>La mampostería en la actualidad sigue siendo un elemento esencial en el sector de la construcción, sin embargo, también es foco de falla ante cargas laterales, lo que ha impulsado a muchos investigadores a realizar un sinnúmero de ensayos variando la modalidad de reforzamiento, entre ellas, adicionando fibras ya sea aplicándolas mediante mallas entre el muro de mampostería y el revestimiento, en el mortero de pega y en el mortero de revestimiento.</p> <p>Este trabajo muestra los resultados del ensayo a corte de diez muretes y ensayo a compresión de doce prismas de ladrillo de arcilla con mortero de cemento adicionando fibras al revestimiento, todos estos con control de desplazamientos mediante transductores LVDT. Se evidenció que la adición de fibra comercial de polipropileno PP mejoró la capacidad a corte y compresión de los especímenes mientras que los especímenes con fibra de plástico reciclado PET (Tereftalato de polietileno) presentaron esfuerzos menores que los que no tenían fibra. Las muestras que tenían PET resultaron ser más rígidas reflejando módulos de elasticidad muy elevados.</p>	<p>Masonry remains an essential element in the construction sector today; however, it is also a source of failure under lateral loads. This has prompted many researchers to conduct numerous tests with varying reinforcement methods, including adding fibers to the mortar, the lining mortar, or applying them through mesh between the masonry wall and the lining.</p> <p>This research presents the results of shear tests on ten low walls and compression tests on 12 clay brick prisms with cement mortar, with fibers added to the lining. All of these tests were monitored using LVDT transducers. It was evident that the addition of commercial PP fiber improved the shear and compression capacities of the specimens, while the specimens with recycled PET plastic fibers exhibited lower stresses than those without fibers. The samples with PET were stiffer, reflecting very high modulus of elasticity.</p>
<p>Palabras claves: compresión axial, esfuerzo cortante y fibra</p>	<p>Keywords: axial compression, fiber and shear stress.</p>

Nota Editorial: Recibido: 26 de Mayo 2025 Aceptado: 30 de Julio 2025

1. INTRODUCCIÓN

La mampostería ha sido utilizada en el sector de la construcción históricamente. Su proceso de manufactura ha venido mejorando con la implementación de diferentes materiales, sin embargo, frente a la acción de cargas laterales (especialmente sismos) han presentado fallas frágiles y explosivas que han provocado que fallen fuera y dentro del plano, occasionando pérdidas humanas y colapsos parciales o totales en estructuras. La construcción de viviendas con muros de mampostería en arcilla no reforzada es tradicional en muchos países. Debido a su baja resistencia y ductilidad, estas edificaciones son muy vulnerables a eventos sísmicos, generando fallas que llevan incluso al colapso total [1].

Actualmente, la mampostería sigue siendo usada en edificaciones en muchos países, lo que ha motivado a ser foco de estudio a nivel experimental implementando nuevos materiales al compuesto estándar generalmente formado por unidades de bloques/ladrillos y mortero de pega. El mortero se utiliza en la fabricación de mamposterías de piedra, pero en mayor cantidad la de ladrillo de arcilla cocida sea de producción artesanal o industrial y de bloque en sus diferentes presentaciones [2].

Los parámetros mecánicos de las piezas y del mortero dependen en gran medida tanto de las características naturales de los materiales, como del proceso de elaboración. Para el mortero, la resistencia depende de sus componentes y dosificación. Las diferentes posibilidades de apilamiento de las piezas, junto con la cantidad y calidad del mortero de las juntas conducen a una amplia gama de tipologías de mampostería [3]

Con el objetivo de la sostenibilidad e innovación en la construcción se ha venido adicionando y aplicando nuevos materiales basados en fibras para reforzar la mampostería; diversas técnicas de reforzamiento, como costura de grietas, inyección de lechada, mallas poliméricas reforzada con fibras han dado como resultado un aumento de resistencia a la compresión y al corte [4].

El revestimiento con mortero ha sido determinante en la resistencia de la mampostería y esto ha sido expuesto en estudios experimentales; se ha demostrado que el revestimiento contribuye a aumentar la resistencia a compresión vertical de los elementos de mampostería y para morteros de una sola capa al aumentar el espesor de 1,5 cm a 3 cm la capacidad de carga aumenta aproximadamente un 14% [5].

Ensayos experimentales realizados a muretes y prismas adicionando fibra corta de yute [4], ceniza de eucalipto [6] y cenizas de biomasa vegetal (astillas de eucalipto, cenizas de bagazo de caña de azúcar y cenizas de cascarilla de arroz) [7] en diferentes porcentajes como reemplazo del material cementicio que conforma el mortero de revestimiento resultaron incrementar significativamente las propiedades mecánicas de la mampostería; pudiéndose aseverar que el uso de cenizas de biomasa como sustituto del cemento para la producción de morteros de revestimiento es tecnológicamente viable [8].

Adicionalmente, se encontró una investigación donde se reforzó el mortero de pega mediante esterilla de guadua, pero no se observó un aumento de resistencia en los muretes reforzados, sin embargo, se observó un aumento en la deformación y en su ductilidad [9]; y otra investigación donde se reforzó con vidrio triturado en donde los valores obtenidos fueron favorables en todas las proporciones; las muestras con vidrio superaron la resistencia a la compresión y a la flexión del mortero estándar [10].

En Ecuador, la mampostería forma parte del medio de la construcción, a pesar de ello, frente a eventos sísmicos siguen siendo los principales focos de fallas, un ejemplo de esto fue el sismo de Pedernales en el 2016 donde las fallas que se presentaron en la mampostería fue de tipo explosiva, lo que induce a pensar en una falta de ductilidad del material, elevada fragilidad y un pésimo proceso constructivo [11].

En el país existe la normativa para mampostería estructural NEC_SE_MP, misma que en la actualidad está siendo objeto de actualización, por lo que han surgido investigaciones donde se recomienda que en cuanto a las propiedades mecánicas de la mampostería (resistencia diagonal y a compresión), de gran utilidad resultaría la inclusión de tablas con resistencias de diseño referenciales. Tales resistencias deberían obtenerse de ensayos sobre muretes realizados con materiales característicos del país [12].

En cuanto al aumento de la capacidad computacional durante los últimos cuarenta años ha dado lugar a una gran base de modelado numérico de elementos estructurales de mampostería junto con una creciente sofisticación en el modelado. Para capturar con precisión la capacidad y el comportamiento de la mampostería, estos modelos sofisticados requieren muchos parámetros materiales, que se extraen de esfuerzos de investigación experimental [13]. Es por eso, que esta investigación tiene como objetivo obtener los parámetros mecánicos (Módulo de elasticidad, resistencia a corte y compresión) mediante ensayos de tracción diagonal y compresión en el reforzamiento de la mampostería de ladrillo macizo de arcilla mediante la adición de una fibra sintética de polipropileno PP y una fibra a base de plástico reciclado PET elaborada artesanalmente para que los resultados puedan ser usados y estudiados a nivel de diseño.

2. METODOLOGÍA

Se ensayaron a tracción diagonal 10 muretes para obtener la resistencia a corte, se muestran en la tabla 1 las características de los especímenes: 2 muretes sin revestimiento (SE) y sin fibra (SF): (M001_SE_SF y M002_SE_SF), 2 muretes con revestimiento (CE) y sin fibra (SF): (M001_CE_SF y M002_CE_SF), 3 muretes con revestimiento (CE) y con fibra comercial PP (CFC): (M001_CE_CFC, M002_CE_CFC y M003_CE_CFC) y 3 muretes con revestimiento (CE) y con fibra PET reciclada (CFP): (M001_CE_CFP, M002_CE_CFP y M003_CE_CFP).

Respecto a los prismas, se ensayaron 12 especímenes para obtener la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de cada uno de ellos, se muestran en la tabla 1 sus características: 3 prismas sin revestimiento (SE) y sin fibra (SF): (P001_SE_SF, P002_SE_SF y P003_SE_SF), 3 prismas con revestimiento (CE) y sin fibra (SF): (P001_CE_SF, P002_CE_SF y P003_CE_SF), 3 prismas con revestimiento (CE) y con fibra comercial PP (CFC): (P001_CE_CFC, P002_CE_CFC y P003_CE_CFC) y 3 prismas con revestimiento (CE) y con fibra PET reciclada (CFP): (P001_CE_CFP, P002_CE_CFP y P003_CE_CFP).

Tabla 1: Características de los materiales en los muretes y prismas

MURETES				PRISMAS			
Código de muretes	Revestimiento	Fibra sintética PP	Fibra reciclada PET	Código de prismas	Revestimiento	Fibra sintética PP	Fibra reciclada PET
M001_SE_SF	-	-	-	P001_SE_SF	-	-	-
M002_SE_SF	-	-	-	P002_SE_SF	-	-	-
M001_CE_SF	✓	-	-	P003_SE_SF	-	-	-
M002_CE_SF	✓	-	-	P001_CE_SF	✓	-	-
M001_CE_CFC	✓	✓	-	P002_CE_SF	✓	-	-
M002_CE_CFC	✓	✓	-	P003_CE_SF	✓	-	-
M003_CE_CFC	✓	✓	-	P001_CE_CFC	✓	✓	-
M001_CE_CFP	✓	-	✓	P002_CE_CFC	✓	✓	-
M002_CE_CFP	✓	-	✓	P003_CE_CFC	✓	✓	-
M003_CE_CFP	✓	-	✓	P001_CE_CFP	✓	-	✓
Simbología:	- No contiene	✓ Sí contiene		P002_CE_CFP	✓	-	✓
				P003_CE_CFP	✓	-	✓

Se hizo uso de un marco de reacción de 2,06 m de altura y 1,91 m de ancho (Figura 1), mediante un gato hidráulico manual se manipula para que circule un flujo de aceite mediante mangueras hidráulicas conectadas al actuador para que direccione y controle la velocidad de la carga.

Se usó una celda de carga con capacidad de lectura de 300 kN, los Datalogers receptan la información y la procesan para ser enviada a un computador, se usó el que estaba calibrado para una carga de 300 kN y desplazamientos de hasta 200 mm, los desplazamientos fueron medidos mediante unos sensores denominados LVDT que basan su funcionamiento en el movimiento de un núcleo dentro del cuerpo del sensor, ayudando a determinar los cambios de desplazamiento sobre las superficies de los elementos [14].

El gato hidráulico dirige al actuador hidráulico desplazándolo hacia la celda de carga generando que, mediante la presión ejercida hacia el espécimen sostenido con placas de acero, haga llegar al fallo del mismo, mientras que el Datalogers procesa la información logrando una lectura cada dos segundos, obteniendo desplazamientos con ayuda de los LVDT y su respectiva carga durante el ensayo. Adicionalmente, se usó una cámara EOS R 100 a 1,00 metro del espécimen y con un intervalómetro se capturó tomas cada 2 segundos para ser procesada en un software denominado Gom Correlate que es empleado en la correlación de imágenes digitales DIC, esto como método alternativo para obtener desplazamientos y deformaciones.

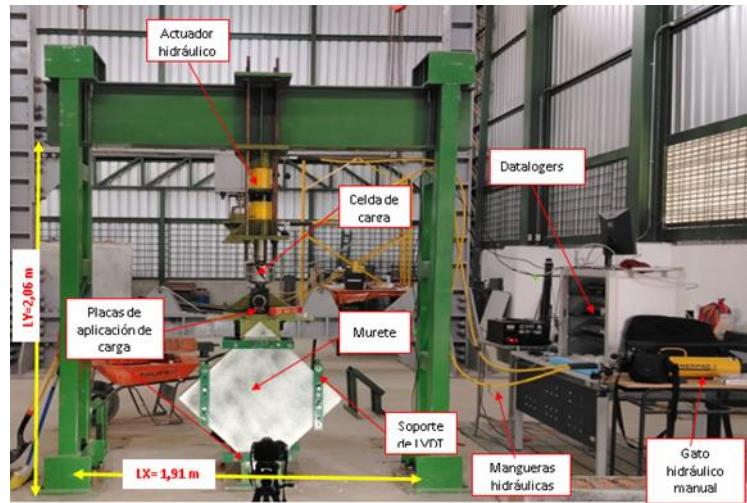


Fig. 1- Equipamiento para ensayo de tracción diagonal y compresión.

2.1. Materiales

La unidad de ladrillo usada para el mampuesto fue maciza de arcilla elaborada artesanalmente, la ladrillera está ubicada en el cantón Santa Ana-Manabí-Ecuador con coordenadas UTM 570580,32 m Este y 9866629,96 m Norte, con medidas de 0,27x0,11x0,06 m como se observa en la figura 2. Existe una investigación donde se realizó ensayos a compresión de la misma ladrillera donde la tracción máxima promedio es de 3,432 MPa [15].

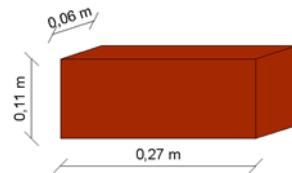


Fig. 2- Dimensiones del ladrillo macizo de arcilla.

El mortero de pega fue obtenido en base a la mezcla de cemento, arena y agua obteniendo un mortero M15 según la NEC-SE-MP Mampostería Estructural, significando una resistencia mínima a la compresión a los 28 días de 15,0 MPa como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2- Clasificación y dosificación por volumen de mortero de relleno. Fuente: NEC-SE-MP (2015)

Tipo de mortero	Resistencia mínima a compresión 28 días (MPa)	Composición en partes por volumen		
		Cemento	Cal	Arena
M20	20,0	1,0	-	2,5
M15	15,0	1,0	-	3,0
		1,0	0,5	4,0

Se elaboraron tres tipos de mortero de revestimiento: el primero fue elaborado únicamente a base de cemento, arena y agua para obtener una resistencia mínima a compresión a los 28 días de 20,0 MPa denominado como mortero M20 según la composición que se detalla en la tabla 2, el segundo adicionando a la primera mezcla fibras sintéticas de PP que ya vienen con dosificación definida y a la tercera se adicionó fibras de plástico reciclado PET que se usó 0,1 kg por cada 25,0 kg de cemento.

La fibra sintética usada fue la EPS FIBRATEX (Figura 3a) que son fabricadas a base de polipropileno virgen y cumplen con las especificaciones ASTM C1116-89 que sirve para evitar fisuras en hormigones y morteros, dando mayor resistencia a compresión, tracción y flexión; se usó la presentación de 0,142 kg que viene para mezclar en 50,0 kg de cemento (en seco) sin hacer cambios en la dosificación del mortero convencional. Estas fibras tienen 5,0 mm de espesor y 19,0 mm de largo.

La fibra de plástico reciclado fue obtenida de botellas recicladas, las cuales se hiló manualmente con medidas de espesor entre 1,0 a 2,0 mm, y de largo hasta 30,0 mm (Figura 3b). Es importante mencionar que hasta el 2022, en Ecuador se generaron 627 000 toneladas de residuos plásticos, de las cuales apenas un 7.7% se reciclaron [16], la construcción al ser una industria con gran impacto en la economía ecuatoriana es el lugar idóneo para apoyar a una solución usando este desecho [17]. Existen estudios que avalan que la adición de PET reciclado ha sido útil para incrementar propiedades mecánicas como: bloques de hormigón con un 20, 40, 60 y 80 por ciento de PET reciclado en sustitución del material pétreo grueso [18]; PET reciclado en proporciones de 1,5%, 3% y 4,5% mezcla asfáltica para un pavimento ecológico [19]; el uso de un 2,5 % de cemento en los materiales granulares con adición de fibras sintéticas de PET para estabilizar una base granular [20].



Fig. 3- a) Fibra sintética EPS FIBRATEX y b) Fibra de PET reciclado, elaborada artesanalmente.

Los muretes están formados por ladrillos artesanales de arcilla de 9 hileras, mortero de pega de 0,015 m de espesor y mortero de revestimiento con y sin fibra de 0,015 m de espesor, dimensiones de 0,65 m altura y 0,65 m de ancho, el espesor para muretes sin enlucido fue de 0,11 m, mientras que para los muretes con enlucido y reforzados fue de 0,14 m (Figura 4a). Los prismas fueron elaborados con los mismos materiales de los muretes, pero con hileras de 5 ladrillos, con una altura de 0,36 m y el ancho igual a 0,26 m, espesores de 0,11 y 0,14 m para prismas sin revestimiento y con revestimiento, respectivamente, cumpliendo con el mínimo de hileras y la relación mínima de esbeltez como se especifica en la NEC_SE_SM (Figura 4b).

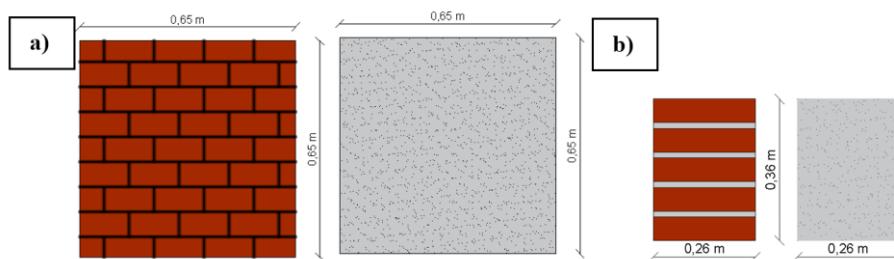


Fig. 4- Dimensiones de los a) muretes y b) prismas.

2.2.. Ensayos

Determinación de la resistencia a compresión del mortero de revestimiento

Se fabricaron 27 cubos de mortero de cemento hidráulico para revestimiento: 9 sin fibra, 9 con fibra de PP y 9 con fibra de PET reciclado, basado en la norma ASTM C-109; los cubos tenían dimensiones de 0,05 m y se ensayaron en edades de 7, 14 y 28 días posteriormente a su elaboración (3 cubos por cada edad de ensayo). En la figura 5 se muestran imágenes del proceso de elaboración, curado y ensayo de los cubos de mortero



Fig. 5- a) proceso de elaboración, b) curado y c) ensayo de los cubos de mortero

Determinación de la tracción diagonal(corte) en ensamblajes de mampostería

Este método de ensayo está basado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015 capítulo NEC-SE-MP para mampostería estructural y en la normativa internacional ASTM E519/E519M – 22. Este determina la resistencia al corte del murete sometiéndolo a cargas a lo largo de una de sus diagonales. Las dimensiones que recomiendan las normas son de 1,20 x1,20 m, sin embargo, mencionan que, si la prensa de ensayo no puede acomodar el espécimen con esa medida, se puede ensayar muretes con medidas menores con fines investigativos.

Por ello, se ensayaron muretes de $65,0 \times 65,0$ cm ya que la norma permite dimensiones menores en estudios experimentales, la decisión se basó en criterios de eficiencia y control, manteniendo iguales condiciones constructivas en todos los especímenes: tamaño, unidad de mampostería, mortero y mano de obra; variando únicamente la adición de la fibra en el mortero de revestimiento.

Una vez que se elaboraron los 10 muretes (Figura 6a) se procedió a realizar el proceso de curado que consistió en hidratarlos durante las 24 primeras horas, después fueron cubiertos con fundas de plástico durante 14 días (figura 6b), para posteriormente dejarlos descubiertos en condiciones naturales en el laboratorio hasta que cumplan los 28 días. 24 horas antes del ensayo se refrentaron las caras de apoyo de aplicación de carga con pasta de yeso (figura 6c), esto para que exista un contacto uniforme entre los cabezales y las caras de apoyo del murete. Por último, se creó una superficie en una cara de cada murete con pintura blanca y negra (Figura 6d), esto para que se puedan analizar mediante el método DIC.



Fig. 6- Muretes: a) elaboración, b) proceso de curado, c) refrentado y d) pintado para DIC

Los 10 muretes se ensayaron a los 28 días, se verificó que el equipamiento estuviera funcional (Figura 7a), luego se colocó el espécimen en forma diagonal, es decir, a 45 grados sobre la horizontal, esto sobre el cabezal inferior tal que coincidiera con el cabezal superior y se verificó que estuviera centrado. Posteriormente, se colocaron los dispositivos LVDT sobre sus respectivos soportes asegurándose que estén correctamente colocados sin que estén en contacto directo con el murete (Figura 7b). A la vez se colocó en un trípode la cámara EOS R 100 a 1,0 m del espécimen para obtener las tomas cada 2 segundos para después ser procesada mediante la DIC (Figura 7c), se midió la distancia entre los soportes de los LVDT (Figura 7d) y se marcaron puntos estratégicos en el murete para poder escalarlos en el software cuando se procese la información (Figura 7e).

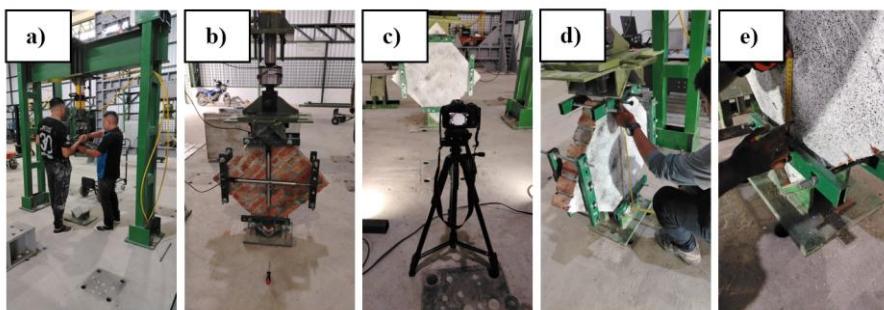


Fig. 7- a) Verificación de los equipos, b) colocación de los LVDT, c) cámara EOS R100 d) Medición entre soportes LVDT y e) toma de puntos estratégicos.

Se realizó el ensayo mediante la manipulación del gato hidráulico manual intentando mantener un ritmo constante para la aplicación de la carga, evitando pausas o cargas abruptas; mientras que los LVDT iban midiendo los desplazamientos en tiempo real en ambas direcciones, esto se hizo hasta llevar al fallo el elemento y así poder obtener el esfuerzo a corte de cada uno (Figura 8).

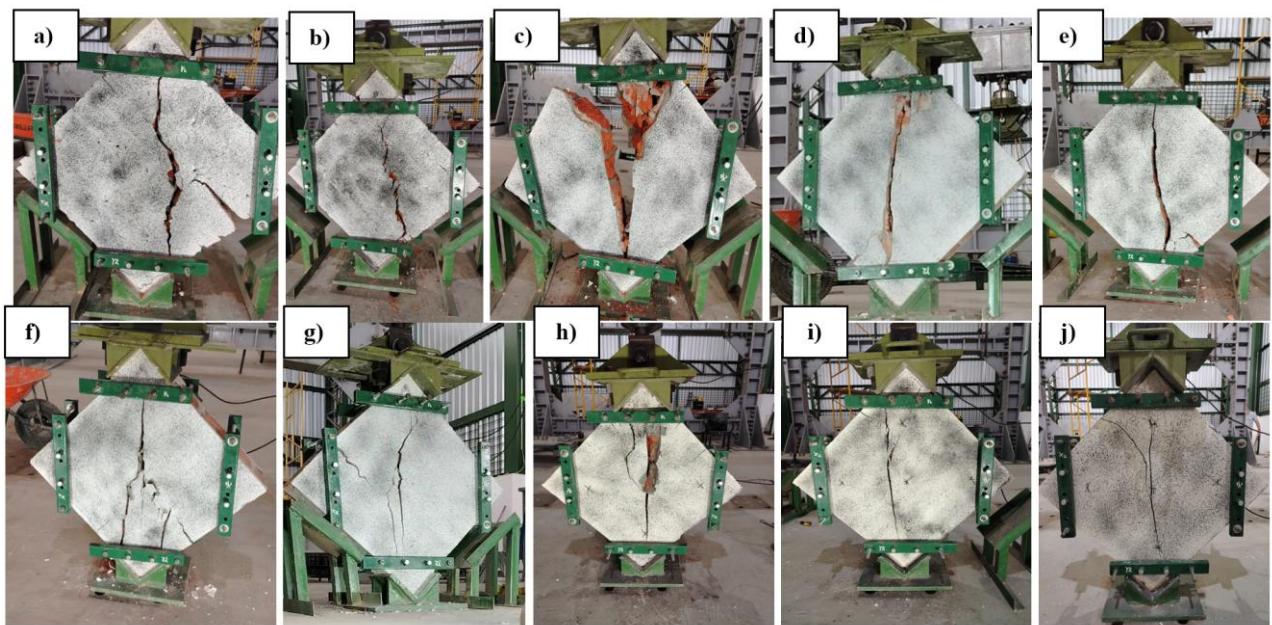


Fig. 8- a) M001-SE-SF, b) M002-SE-SF, c) M001-CE-SF, d) M002-CE-SF, e) M001-CE-CFC, f) M002-CE-CFC, g) M003-CE-CFC, h) M001-CE-CFP, i) M002-CE-CFP y j) M003-CE-CFP

El esfuerzo a corte se determinó en base a la ASTM E519/E519M– 22, siendo este la razón entre la carga aplicada (N) y el área neta (mm^2), multiplicado por un factor como se muestra en la ecuación (1).

$$S_s = \frac{0,707 * P}{A_n} \quad (1)$$

La ecuación (2) muestra el área neta A_n del espécimen en mm^2 que está en función de: ancho w y el alto h , el espesor t y porcentaje del área total de la unidad que es sólida n , expresada como decimal; en unidades de mm. El valor n dependerá si la unidad de mampostería es maciza o hueca, para fines de esta investigación se ha usado unidades de mampostería maciza por lo que su valor es 1.

$$A_n = \frac{(w + h)}{2} * t * n \quad (2)$$

La deformación por corte γ que se obtuvo mediante la ecuación (3) en mm/mm , está en función de la sumatoria del acortamiento vertical ΔV en mm y el ensanchamiento horizontal ΔH en mm, dividida por la longitud de base vertical en mm.

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (3)$$

Mediante la ecuación (4) se obtiene el módulo de rigidez G en MPa, que resulta de la relación entre el esfuerzo de corte S_s en MPa y la deformación por corte γ en mm/mm

$$G = \frac{S_s}{\gamma} \quad (4)$$

Determinación de la resistencia a compresión de prismas de mampostería $f'm$

Este método de ensayo está basado en la NEC-SE-MP y la ASTM C1314-22, los cuales abarcan procedimientos para la construcción de prismas y los procedimientos para determinar la resistencia a compresión $f'm$. Se construyeron 12 prismas con sus respectivas variantes; el proceso de curado, refrentado y preparación de los especímenes se llevó a cabo de igual forma como los muretes, como se evidencia en la figura 9.

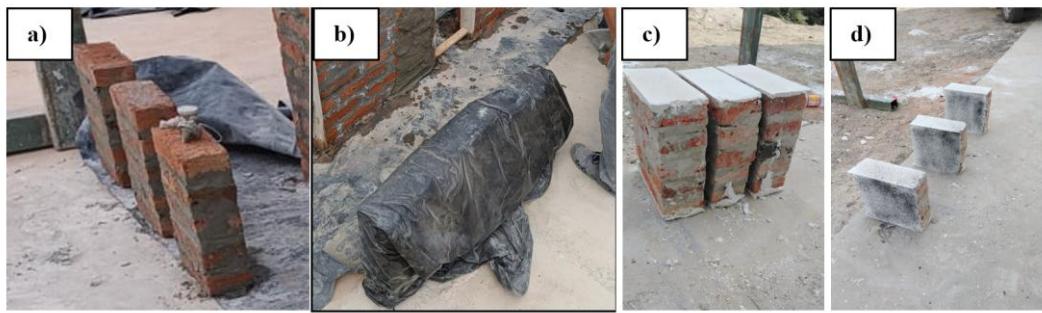


Fig. 9- Prismas: a) elaboración, b) proceso de curado, c) refrentado y d) pintado para DIC

Se procedió a realizar el ensayo siguiendo el mismo procedimiento que los muretes, diferenciándose, porque para estos ensayos se colocaron LVDT con lectura hasta de 50 mm de desplazamientos debido al menor recorrido que se tiene en relación a los muretes y se colocaron de manera vertical en los cabezales. Todos los especímenes se ensayaron hasta llegar al fallo como se evidencia en la figura 10.

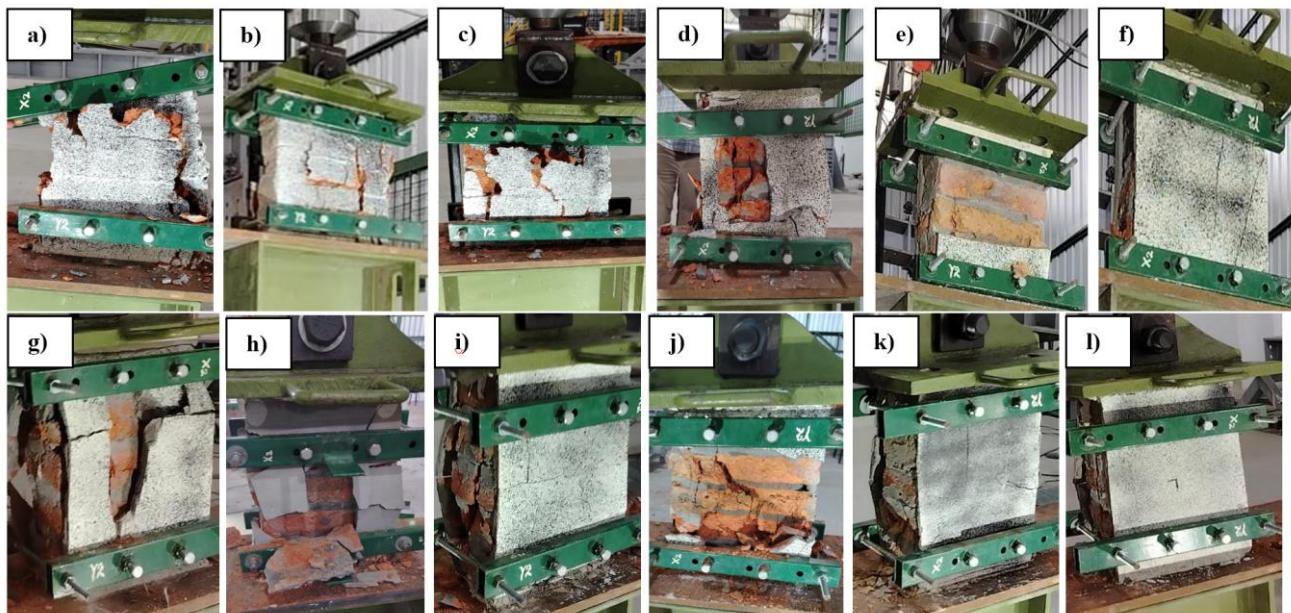


Fig. 10- a) P001-SE-SF, b) P002-SE-SF, c) P003-SE-SF, d) P001-CE-SF, e) P002-CE-SF, f) P003-CE-SF, g) P001-CE-CFC, h) P002-CE-CFC, i) P003-CE-CFC, j) P001-CE-CFP, k) P002-CE-CFP y l) P003-CE-CFP

La resistencia a compresión $f'm$ se la obtiene mediante la ecuación (5), que es la razón entre la carga aplicada P en Newton (N) y el área neta efectiva del prisma en milímetros cuadrados (mm^2), multiplicado por un factor de corrección de esbeltez h_p/t_p , que relaciona la altura y el espesor del prisma en mm; este factor ajusta el valor calculado de la resistencia en función de la geometría del espécimen, de modo que, a mayor esbeltez, el valor numérico de $f'm$ aumenta. Sin embargo, esto no implica que el prisma sea estructuralmente más resistente, ya que, en términos de comportamiento real, un elemento más esbelto tiende a ser más vulnerable al pandeo y a inestabilidades bajo carga axial.

$$f'm = \frac{P}{A_n} * \frac{h_p}{t_p} \quad (5)$$

El área neta A_n es el producto de la base b del prisma por el espesor t en mm y se detalla en la ecuación (6).

$$A_n = b * t \quad (6)$$

2.3. Resultados

Ensayo de tracción diagonal (corte) en ensamblajes de mampostería

En la figura 11a se muestran las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes sin mortero de revestimiento y sin fibra, para el murete M001_SE_SF hasta los 0,191 MPa de esfuerzo a corte con una deformación de 0,00159 mm/mm tiene un comportamiento lineal elástico y hace un cambio de pendiente abrupto significando que se pudo haber formado una grieta considerable para después continuar con una pendiente elástica hasta los 0,735 MPa con una deformación de 0,0024 mm/mm haciéndolo fallar por corte; en cambio, para el M001_SE_SF tuvo un comportamiento elástico hasta los 0,808 MPa de resistencia a corte y llegando al fallo, alcanzando una deformación de hasta 0,000616 mm/mm.

En la figura 11b se visualizan los resultados para los especímenes con mortero de revestimiento, pero sin reforzamiento; las dos curvas presentan un comportamiento bastante similar, tienen un recorrido elástico hasta llegar al fallo, la máxima resistencia al corte del espécimen M001_CE_SF fue de 0,765 MPa con una deformación de 0,000301 mm/mm mientras que el M002_CE_SF llegó al fallo con 0,814 MPa y alcanzó deformaciones hasta de 0,0013 mm/mm.

En la figura 11c se reflejan los resultados de los especímenes con mortero de revestimiento y con fibra sintética de PP, las curvas de los especímenes M001_CE_CFC, M002_CE_CFC y M003_CE_CFC que se observan tienen comportamientos análogos y llegan al fallo alcanzando resistencias al corte de 0,831, 0,845, 0,764 MPa y deformaciones de 0,00157, 0,00312 y 0,000870 mm/mm, respectivamente.

En la figura 11d se reflejan los resultados de los especímenes con mortero de revestimiento y fibra de plástico reciclado, las curvas de los especímenes M001_CE_CFP, M002_CE_CFP y M003_CE_CFP tienen recorridos similares y llegan al fallo alcanzando resistencias al corte de 0,794, 0,688, 0,731 MPa y deformaciones de 0,00131, 0,000959 y 0,0006 mm/mm, respectivamente.

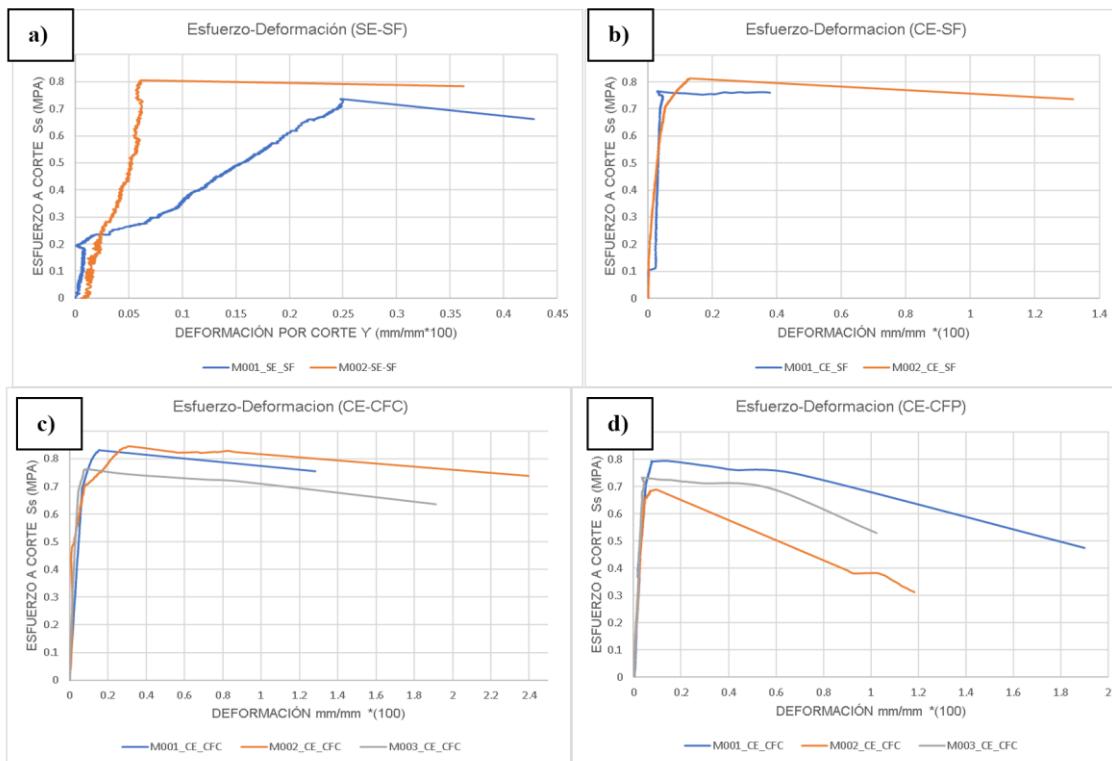


Fig. 11- Curvas esfuerzo a corte- deformación de los muretes: a) SE_SF, b) CE_SF, c) CE_CFC y d) CE_CFP

En la figura 12 se presentan las curvas que está en función de la carga aplicada sobre el murete vs los desplazamientos horizontales (izquierda) y verticales (derecha), se observa que los desplazamientos verticales son mayores a los horizontales, esto, debido a la dirección de la carga aplicada sobre un eje vertical, llegando a valores de hasta de 1,683 mm de desplazamiento vertical y 0,305 de desplazamiento horizontal para el espécimen M002_CE_CFC.

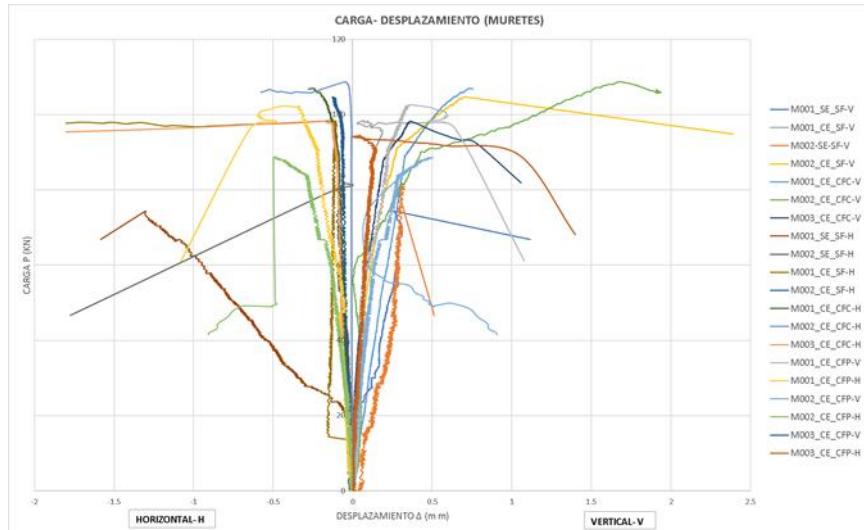


Fig. 12- Curvas carga- desplazamiento en ambas direcciones para muretes.

En la tabla 3 se presenta un compendio de los resultados del ensayo a corte de los muretes, donde se puede observar que la carga y esfuerzo a corte promedio con valores de 78,070 kN y 0,772 MPa, respectivamente, a la que falla un murete sin revestimiento es menor en comparación a los que tienen solo revestimiento y revestimiento con fibras, reafirmando la influencia positiva que tiene el revestimiento en la capacidad de carga a corte reflejando valores de carga y resistencia a corte hasta de 104,667 kN y 0,813 MPa, respectivamente, esto para muretes reforzados con fibra comercial; este resultado indica una mejora limitada del 3% en relación a los muretes con revestimiento pero sin fibra cuyo esfuerzo promedio a corte es de 0,789 MPa, posiblemente relacionada con la naturaleza de la fibra y su interacción mecánica dentro del mortero.

Se puede observar que los muretes reforzados con fibras de PET reciclado fallan con una carga promedio de 94,973 kN y esfuerzo a corte promedio de 0,738 MPa, siendo estos valores menores a los resultados de los muretes con revestimiento, pero sin fibras y los muretes reforzados con fibra comercial PP. Además, los muretes con fibra comercial PP tuvieron mayor capacidad de deformación por corte en relación al resto de especímenes.

Tabla 3- Resumen de resultados del ensayo a corte de los muretes

Código	Carga P	Carga promedio P	Esfuerzo a corte Sus ASTM E519	Esfuerzo promedio a corte Ss ASTM E519	Deformación por corte γ	Módulo de corte G ASTM E519	Desplazamiento mm	
	kN	kN	MPa	MPa	mm/mm	MPa	X	Y
M001_SE_SF	74,380	78,070	0,735	0,772	0,00248	297	0,258	1,302
M002_SE_SF	81,760		0,808		0,00062	1312	0,064	0,324
M001_CE_SF	98,430	101,580	0,765	0,789	0,00030	2535	0,070	0,120
M002_CE_SF	104,730		0,814		0,00132	617	0,127	0,703
M001_CE_CFC	106,990		0,831		0,00157	528	0,254	0,736
M002_CE_CFC	108,730	104,667	0,845	0,813	0,00316	267	0,305	1,683
M003_CE_CFC	98,280		0,764		0,00087	877	0,187	0,361
M001_CE_CP	102,290		0,795		0,00132	603	0,194	0,365
M002_CE_CP	88,560	94,973	0,688	0,738	0,00096	717	0,107	0,497
M003_CE_CP	94,070		0,731		0,00060	1218	0,003	0,375

Mecanismos de fallas en los muretes

Para los especímenes de las figuras 13a y b se presentaron fallas de tipo explosiva y de aplastamiento, iniciando las grietas desde la placa de carga extendiéndose de manera vertical hasta la placa de acero inferior, también se observaron grietas diagonales; la falla explosiva se debe a que estos especímenes no contaban con mortero de recubrimiento ni algún tipo de reforzamiento. Los especímenes de las figuras 13c y d se formaron grietas desde la zapata de acero superior llevando recorrido hasta la inferior, con una tendencia vertical siguiendo el sentido de aplicación de la carga, en comparación con los muretes sin recubrimiento, estos presentaron grietas de menor espesor y el fallo no fue abrupto. Los especímenes de las figuras 13e, 13f y 13g presentaron mecanismos de fallas similares, con grietas verticales que iniciaban desde el punto de aplicación de carga hasta la placa inferior y se desprendían grietas diagonales presenciando fallos por tracción diagonal.

Para los especímenes con fibra PET reciclada se observa una concentración de esfuerzos y deformaciones desde la zona de apoyo de la carga generando grietas que parten desde esa zona y se extienden de manera vertical y diagonal hasta el extremo inferior, siguiendo el eje de aplicación de la carga, fallando por tracción diagonal y por aplastamiento en las esquinas, es decir, la mampostería falla como un conjunto por tracción pura como se muestran en las figuras 13 h, i y j.

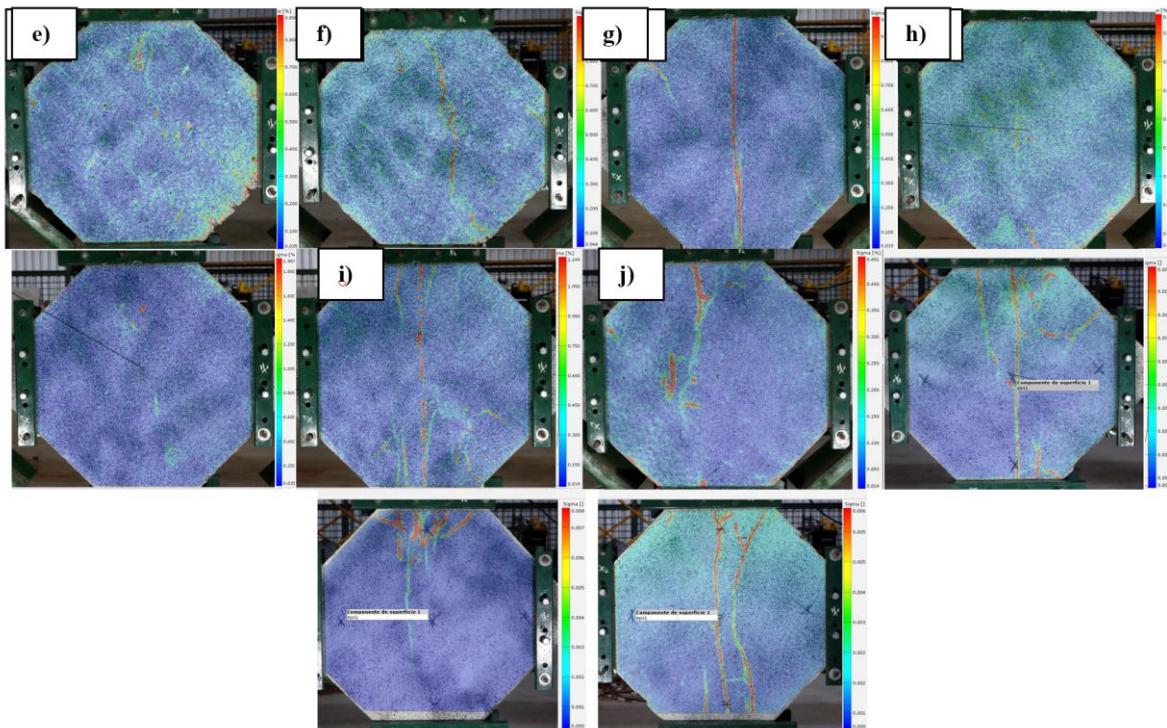


Fig. 13- Mecanismos de falla en muretes ensayados: a) M001-SE-SF, b) M002-SE-SF, c) M001-CE-SF, d) M002-CE-SF, e) M001-CE-CFC, f) M002-CE-CFC, g) M003-CE-CFC, h) M001-CE-CFP, i) M002-CE-CFP y j) M003-CE-CFP

Ensayo para determinar la resistencia a compresión de prismas de mampostería $f'm$

Se obtuvieron mediante ensayo las curvas de esfuerzo- deformación de los prismas sin mortero de recubrimiento y sin reforzamiento, como se evidencia en la figura 14a el espécimen P001_SE_SF obtuvo una resistencia a la compresión máxima de 4,056 MPa alcanzando una deformación de 0,0126 mm/mm, el P002_SE_SF muestra que a los 3,564 MPa llega al fallo con una 0,0139 mm/mm de deformación, y el P003_SE_SF alcanzó una resistencia de 3,622 MPa deformándose 0,00470 mm/mm; los dos primeros especímenes alcanzaron grandes deformaciones en comparación con el tercero.

En la figura 14b se reflejan las curvas de los especímenes con enlucido y sin fibra, para el P001_CE_SF se observa que alcanzó un esfuerzo a corte de 1,819 MPa dentro del comportamiento lineal siguiéndose desplazando bajo una variación de esfuerzo mínima, para luego alcanzar un esfuerzo de 2,757 MPa y con una deformación de 0,00361mm/mm aproximadamente y finalizar con el fallo; de manera similar el espécimen P003_CE-SF llegó al fallo, pero este último alcanzo un esfuerzo dentro del rango lineal de 3,106 MPa y una deformación de 0,00216 mm/mm. Sin embargo, el espécimen P002_CE_SF alcanzó un esfuerzo antes del fallo de 3,02 MPa y deformándose 0,0133 mm/mm.

En la figura 14c se presentan los resultados de los especímenes con enlucido y fibra comercial de PP donde se observa que las 3 curvas alcanzan esfuerzos similares de 3,208, 3,505 y 3,134 MPa con deformaciones de 0,000394, 0,00459 y 0,00141 mm/mm para los especímenes P001_CE_CFC, P002_CE_CFC y P003_CE_CFC, respectivamente. Y en la figura 14d se observan las curvas con enlucido y fibra reciclada de PET, con esfuerzos de 2,749, 2,774 y 2,462 MPa con deformaciones de 0,000753, 0,000097 y 0,000047 mm/mm para los especímenes P001_CE_CFP, P002_CE_CFP y P003_CE_CFP, respectivamente. El espécimen P002_CE_CFP falló de manera explosiva y no alcanzó mayor deformación en comparación de los otros especímenes.

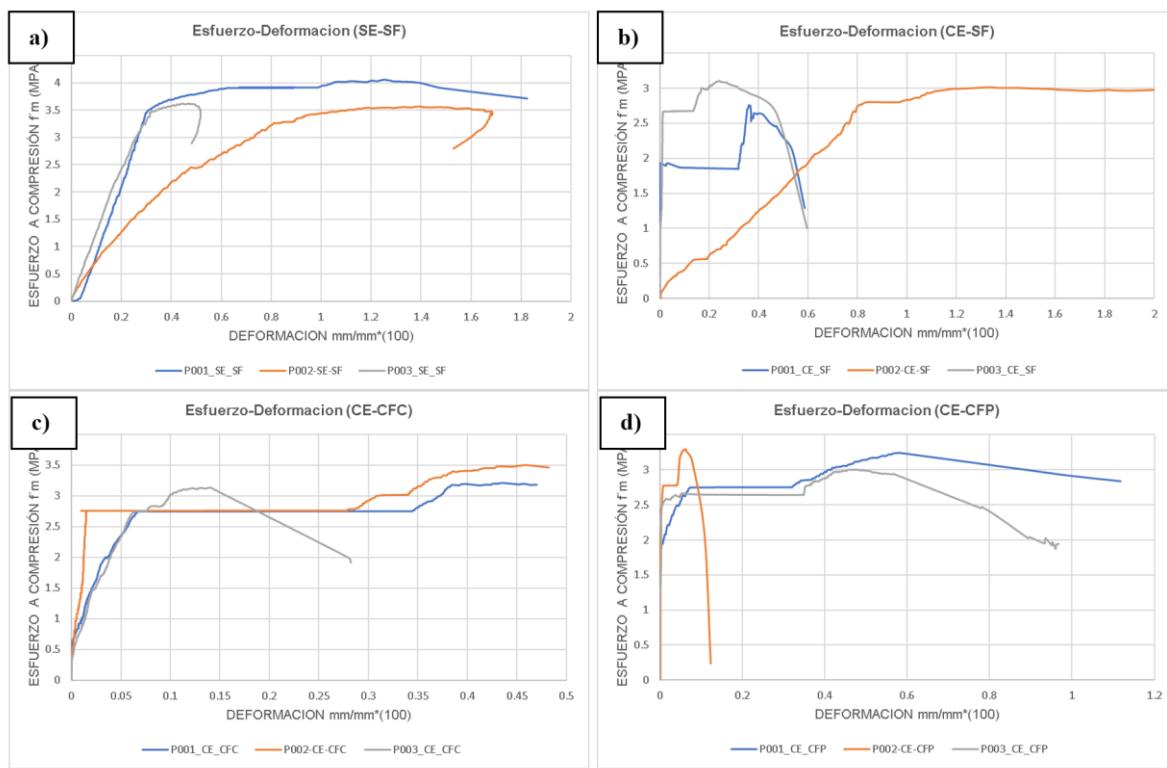


Fig. 14- Curvas esfuerzo a compresión- deformación de los prismas: a) SE_SF, b) CE_SF, c) CE_CFC y d) CE_CFP

En la tabla 4 se puede observar que, respecto a la carga de falla a compresión promedio se obtuvieron mejores resultados para los prismas reforzados con fibra comercial PP con un valor de 108,267 kN, mientras que el esfuerzo a compresión resultó mayor para los prismas sin revestimiento, esto a causa de que el área de influencia es menor y esta es inversamente proporcional al esfuerzo a compresión. Los prismas con fibra de PET reciclado fallaron a una carga promedio de 87,780 kN alcanzando un esfuerzo a compresión promedio de 2,661 MPa, siendo el resultado más bajo en comparación al resto de especímenes.

Tabla 4- Resumen de resultados del ensayo a compresión de los prismas

Código	Carga P	Carga promedio P	Esfuerzo a compresió n Fm ASTM C1314	Esfuerzo a compresión promedio Fm ASTM C1314	Deformació n γ	Módulo de elasticida d Em NEC 2015	Módulo de corte G NEC 2015
	KN	kN	MPa	MPa	mm/mm	MPa	MPa
P001_SE_SF	105,100		4,056		0,012553	1276	510
P002_SE_SF	92,350	97,103	3,564	3,747	0,013931	592	236
P003_SE_SF	93,860		3,622		0,004703	1210	484
P001_CE_SF	90,950		2,757		0,003617	23306	9322
P002_CE_SF	99,500	97,637	3,017	2,960	0,013356	239	95
P003_CE_SF	102,460		3,106		0,002161	13770	5508
P001_CE_CFC	105,820		3,208		0,000394	5696	2278
P002_CE_CFC	115,600	108,267	3,505	3,283	0,004594	1254	501
P003_CE_CFC	103,380		3,134		0,001406	5200	2080
P001_CE_CFP	90,660		2,749		0,000753	14155	5662
P002_CE_CFP	91,480	87,780	2,774	2,661	0,000097	19034	7613
P003_CE_CFP	81,200		2,462		0,000047	26272	10509

Mecanismos de fallas en los prismas

Los prismas de las figuras 14a, b y c, fallaron de manera explosiva esto se justifica dado que no contaban con mortero de revestimiento y el mortero de pega no fue un mortero de alta resistencia, por lo que al alcanzar la resistencia máxima inmediatamente llegaron al colapso y esto también se refleja en las curvas esfuerzo-deformación. La falla explosiva también se pudo haber generado debido a la calidad de los materiales o el proceso constructivo.

Los especímenes con enlucido y sin fibra presentaron fallas de tipo explosiva, los de las figuras 14 d y e iniciaron con grietas verticales que iniciaban en la parte superior y se extendían siguiendo el eje de carga, para después fallar abruptamente; la figura 14f muestra que para ese espécimen hubo una concentración de esfuerzos en las juntas de mortero y grietas inclinadas lo que evidencia un fallo por cortante.

En las figuras 14g-i se observan que hubo concentración de esfuerzos a lo largo del eje de dirección de la carga, generando un fallo por agrietamiento vertical y posteriormente un fallo explosivo; mientras que en la figura h se observa fallo por agrietamiento horizontal. Para los especímenes con fibra PET reciclada ocurrió un movimiento diferencial entre el enlucido y el mampuesto que pudo ser provocado por mala adherencia y por rigidez excesiva, se pudo observar una falla por tracción diagonal a través de unidades y juntas, finalizando con una falla por colapso del sustrato con desprendimiento superficial del revestimiento, es decir, la mampostería ha fallado, y el enlucido, al no tener soporte, simplemente se despegó. Las deformaciones más importantes se concentraron en las juntas horizontales para el espécimen de la figura 14j, mientras que para las figuras 14k y l su tendencia era diagonal.

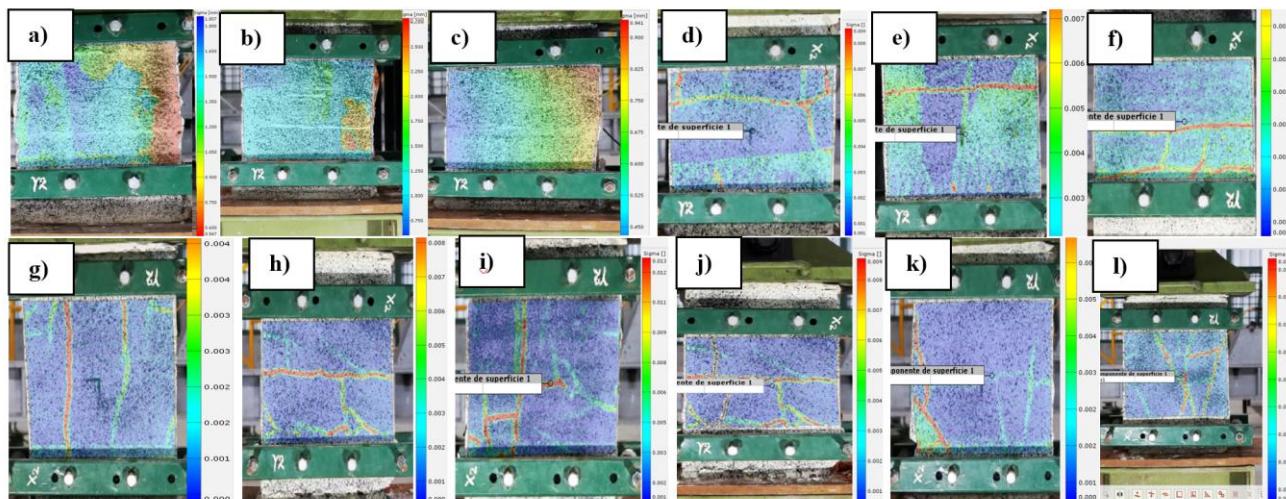


Fig. 14- Mecanismos de falla en prismas ensayados: a) P001-SE-SF, b) P002-SE-SF, c) P003-SE-SF, d) P001-CE-SF, e) P002-CE-SF, f) P003-CE-SF, g) P001-CE-CFC, h) P002-CE-CFC, i) P003-CE-CFC, j) P001-CE-CFP, k) P002-CE-CFP y l) P003-CE-CFP

Ensayo para determinar la resistencia a compresión de mortero de revestimiento

El ensayo reflejó que para los 7 días los cubos obtuvieron resistencias promedio de 11,012, 8,646 y 11,599 MPa para los morteros sin fibra, con fibra PP Y con fibra PET reciclado, respectivamente, siendo este último el mortero con mayor resistencia para esa edad. A los 14 días la resistencia promedio aumentó para los especímenes a 8,646, 11,599 y 15,977 MPa para los morteros sin fibra, con fibra PP Y con fibra PET reciclado, respectivamente. Y, por último, a los 28 días el mortero sin fibra alcanzó una resistencia promedio de 20,818 MPa la cual está por encima de la resistencia mínima requerida para el M20, mientras que los morteros con fibra PP y PET reciclado obtuvieron resistencias promedio de 13,307 y 18,893 MPa, respectivamente, estos resultados son menores a los objetivos como se observa en la tabla 5.

El objetivo de este ensayo fue evaluar la influencia de las fibras añadidas en la resistencia a compresión del mortero de revestimiento teniendo como base un mortero M20, los resultados obtenidos fueron menores a la resistencia mínima requerida para ese tipo de mortero; esto se pudo haber generado por un apisonamiento insuficiente del mortero en el molde debido a la adición de las fibras, lo que creó vacíos o zonas con menor densidad, afectando la resistencia.

Tabla 5: Resistencia a compresión de los cubos de mortero de revestimiento

Tipo de mortero	Código	Edad	Sección transversal	Carga	Resistencia	Resistencia promedio
M20		Días	mm ²	kN	MPa	MPa
Sin fibra	M1	7	2500	17,995	7,198	11,012
	M2	7	2500	32,196	12,878	
	M3	7	2500	32,402	12,961	
Con fibra PP	M1	7	2500	21,751	8,701	8,646
	M2	7	2500	21,497	8,599	
	M3	7	2500	21,595	8,638	
Con fibra PET	M1	7	2500	26,998	10,799	11,599
	M2	7	2500	28,499	11,399	
	M3	7	2500	31,499	12,600	
Sin fibra	M1	14	2500	41,532	16,613	15,977
	M2	14	2500	39,198	15,679	
	M3	14	2500	39,100	15,640	
Con fibra PP	M1	14	2500	35,206	14,083	14,415
	M2	14	2500	37,805	15,122	
	M3	14	2500	35,099	14,039	
Con fibra PET	M1	14	2500	33,902	13,561	14,041
	M2	14	2500	33,500	13,400	
	M3	14	2500	37,903	15,161	
Sin fibra	M1	28	2500	50,525	20,210	20,818
	M2	28	2500	49,701	19,880	
	M3	28	2500	55,909	22,363	
Con fibra PP	M1	28	2500	35,000	14,000	13,307
	M2	28	2500	27,704	11,082	
	M3	28	2500	37,099	14,840	
Con fibra PET	M1	28	2500	46,298	18,519	18,893
	M2	28	2500	44,003	17,601	
	M3	28	2500	51,397	20,559	

3. CONCLUSIONES

El refuerzo de mampostería mediante mortero con fibras sintéticas de PP mostró variaciones significativas en el comportamiento mecánico de los especímenes. Los muretes con fibra de PP presentaron un incremento del 3% en la resistencia a corte (0,813 MPa) y mayor ductilidad alcanzando deformaciones promedio de 0,00187 mm/mm, esto, respecto a los muretes sin fibra cuya resistencia a corte fue de 0,789 MPa. Los prismas con PP alcanzaron 3,283 MPa de resistencia promedio a compresión, valor inferior en un 12,4% al de los prismas sin revestimiento (3,747 MPa), asociado a una mayor área de apoyo en los prismas con revestimiento.

Los especímenes con PET reciclado mostraron reducciones de resistencia del 7% en corte (0,738 MPa) y 11% en compresión (2,661 MPa,) aunque presentaron altos módulos de elasticidad (26.272 MPa) y módulo de corte (10.509 MPa,) lo que se tradujo en un comportamiento rígido y propenso a fallas frágiles, en comparación con los especímenes sin fibra y con revestimiento. El revestimiento sin fibras también mejoró la capacidad de carga, alcanzando 101,580 kN en corte y 97,637 kN en compresión, frente a los 78,070 kN y 97,103 kN obtenidos en los especímenes sin revestimiento.

En cuanto a los morteros, el de mayor resistencia fue el sin fibra (20,818 MPa), seguido por el de PET (18,893 MPa) y el de PP (13,307 MPa). La fibra no mejora necesariamente la resistencia del mortero como material aislado, pero sí mejora el comportamiento estructural del sistema compuesto (murete), especialmente en aspectos como la ductilidad, el control de fisuración o la redistribución de esfuerzos.

En general, la fibra de PP mejoró el desempeño estructural de la mampostería reforzada, mientras que el PET reciclado no resultó adecuado para este fin.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. C. Vega and N. Torres, "External strengthening of unreinforced masonry walls with polymers reinforced with carbon fiber," *Ingeniería e Investigación*, vol. 38, no. 3, pp. 15-23, 2018. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/643/64358742003/html/>
2. R. P. C. Fariño and I. S. C. Baque, "Análisis comparativo para determinar la resistencia y trabajabilidad; entre Mortero tradicional e industrializado Pegablok Tipo N, de INTACO," in *Memorias INPIN 2023*, 2023: Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil, pp. 279-286. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9958928> [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9958928>
3. Y. Franco-Rojas, L. González-Díaz, F. Calderín-Mestre, and R. Galán-Pérez, "Consideraciones acerca del diseño sismorresistente de viviendas con mampostería confinada en Santiago de Cuba," *Ciencia en su PC*, vol. 1, no. 1, pp. 50-65, 2022. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/1813/181372324009/>
4. L. Farias, P. Lima, and R. D. Toledo Filho, "Shear behavior of hollow clay brick masonry wallet coated with short jute fiber reinforced mortar," *Materiales de Construcción*, vol. 74, no. 354, pp. e347-e347, 2024. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9592031>
5. A. Azevedo, J. Q. Delgado, A. Guimarães, F. A. Silva, and R. Oliveira, "Compression behaviour of clay bricks prisms, wallets and walls-Coating influence," *Revista de la Construcción*, vol. 18, no. 1, pp. 123-133, 2019. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2019000100123&script=sci_arttext
6. J. Estrada and J. Reynoso, "Incidencia de ceniza de eucalipto en propiedades mecánicas del mortero de asentamiento de ladrillos artesanales," *Revista Digital Novasinergia*, vol. 7, no. 1, pp. 122-135, 2024. [Online]. Available: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2631-26542024000100122
7. C. Gonçalves, A. Soares, and H. Paula, "Characterization and feasibility of using vegetable biomass ash in mortar," *Revista ALCONPAT*, vol. 11, no. 2, pp. 1-16, 2021. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/4276/427666627002/html/>
8. W. B. Bonfim and H. M. de Paula, "Characterization of different biomass ashes as supplementary cementitious material to produce coating mortar," *Journal of Cleaner Production*, vol. 291, p. 125869, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621000895>
9. L. S. Alarcón, J. R. Manrique, A. P. Agatón, and C. Takeuchi, "Incidencia estructural de la esterilla de bambú guadua ante eventos sísmicos en muretes de mampostería republicana," *Arquitectura y Urbanismo*, vol. 44, no. 1, pp. 33-40, 2023. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/3768/376875562004/>
10. S. Muñoz and S. Mendoza, "Masonry mortar design incorporating crushed recycled glass," *Revista ingeniería de construcción*, vol. 37, no. 3, 2022. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9408822&info=resumen>
11. M. L. Lara, H. Aguirre, and M. Gallegos, "Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado que Colapsaron en el Terremoto del 16 de Abril de 2016 en Tabuga-Ecuador," *Revista Politécnica*, vol. 42, no. 1, pp. 37-46, 2018. [Online]. Available: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292018000400037
12. J. A. Quinde, J. Jiménez-Pacheco, and E. Ortega-Guamán, "Revisión de normas de diseño para mampostería confinada en Latinoamérica: propuestas para la Norma Ecuatoriana de Construcción," *Revista Politécnica*, vol. 51, no. 1, pp. 77-92, 2023. [Online]. Available: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/1360
13. R. D. Pasquantonio, G. A. PARSEKIAN, F. S. FONSECA, and N. G. SHRIVE, "Experimental and numerical characterization of the interface between concrete masonry block and mortar," *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 13, no. 03, pp. 578-592, 2020. [Online]. Available: <https://www.scielo.br/j/riem/a/k7dwBJkWHMg5zN9pYyGqsc/?lang=en>
14. M. A. Jácome Torres, "Desarrollo de un modelo matemático utilizando interpolación de Lagrange para el comportamiento dinámico de sensores de presión LVDT," 2017. [Online]. Available: <https://dspace.espoch.edu.ec/items/39839c5f-0957-492a-b41b-9b6b114e258f>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

15. L. A. Barreiro García, "PUESTA EN VALOR DEL LADRILLO ARTESANAL FABRICADO EN LA CIUDAD DE SANTA ANA DE VUELTA LARGA, PROVINCIA DE MANABÍ," 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9430233>
16. WWF. "Ecuador lidera una histórica hoja de ruta para reducir la contaminación por plásticos." 2025. <https://www.wwf.org.ec/?389213/Ecuador-lidera-una-historica-hoja-de-ruta-para-reducir-la-contaminacion--por-plasticos> (accessed 10 de mayo, 2025)
17. D. S. Sangucho Barros, D. A. Velasco Cevallos, and L. P. Viera Arroba, "Propiedades físicas y mecánicas de reciclados de plásticos producidos en Ecuador como material de construcción," FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, vol. 16, no. 2, pp. 58-69, 2023. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9155359>
18. P. Núñez Naranjo, F. Palacios Pérez, E. Taranto González, and S. Armijos Mena, "Elaboración y caracterización de un material compuesto con polietileno de tereftalato para la fabricación de bloques," Perfiles, vol. 1, no. 29, pp. 52-62, 2023. [Online]. Available: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2477-91052023000100052&lng=es&nrm=iso
19. J. K. Diego-Martínez, E. Temple-Bonilla, and J. P. Muñoz-Arana, "Influencia de un pavimento ecológico con PET reciclado en el sector de 3 de octubre," FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, vol. 18, no. 2, 2024. [Online]. Available: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2602-84842024000200210
20. M. Carballo Rojas, M. D. C. Gallardo Mejía, and M. Murillo Chacón, "Análisis de una base granular estabilizada con cemento y adición de fibras de PET reciclado," Infraestructura Vial, vol. 25, no. 44, pp. 75-84, 2023. [Online]. Available: https://www.scieno.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-37052023000100075