

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



**“ENSAYES DE MUROS CONFINADOS DE MAMPOSTERÍA DE
TABIQUE ROJO RECOCIDO REFORZADOS CON TIRAS DE FIBRA DE
VIDRIO ANTE CARGA LATERAL EN EL PLANO”**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:
ING. ALEJANDRO ESCOBOZA VILLEGAS

DIRECTOR DE TESIS
DR. JESÚS MARTIN LEAL GRACIANO

CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. MARIO DANIEL LLANES TIZOC



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la vida que me da y por haberme permitido culminar mis estudios de posgrado.

A mi Madre Alejandrina Villegas Cosio por darme la vida, por haberme enseñado que las cosas de la vida se logran a base de esfuerzo, dedicación y perseverancia, por apoyarme a cada momento, por ser mi guía y ejemplo a seguir. Para ti Madre que siempre serás mi motivación más grande en esta vida.

A mis hermanos Mario y Aarón, por permitirme escuchar sus consejos y alentarme a la superación continua, por ser mis amigos y compañeros en esta vida.

A mis directores de tesis, el Dr. Jesús Martín Leal Graciano y el Dr. Mario Daniel Llanes Tizoc, por apoyarme en mi desarrollo de mi formación académica, por la paciencia y tiempo brindado en la realización de mi investigación.

A los miembros del comité tutor y sinodales de examen, por las observaciones realizadas a este proyecto de investigación, las cuales contribuyeron a enriquecer el contenido de esta tesis.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa por darme la oportunidad de continuar mi preparación profesional.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por proporcionarme una beca de manutención durante mis estudios de maestría con el número de becario 1146710.

RESUMEN

El crecimiento poblacional ha originado un consumo excesivo de suelo. En consecuencia, comúnmente se opta por la construcción vertical de viviendas multifamiliares a base del sistema constructivo de mampostería confinada. Las condiciones de suelo y la altura de los complejos multifamiliares hacen susceptibles a este tipo de estructuras a los esfuerzos de tensión ocasionados por las fuerzas laterales producidas por las acciones sísmicas. Una alternativa de refuerzo para estructuras de mampostería y concreto es el uso de materiales compuestos, como la fibra de vidrio y de carbono. Existe evidencia en la literatura de que estos materiales aumentan la resistencia a tensión diagonal y la capacidad de deformación de los muros de mampostería. Las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de la Ciudad de México (2020) consideran a los materiales compuestos como una opción de refuerzo para los muros. Sin embargo, debido a la falta de evidencia que permita un mayor respaldo técnico, no especifica la cantidad u orientación adecuada para su uso. En el presente estudio se llevó a cabo la evaluación de los efectos del refuerzo a base de tiras de fibra de vidrio en el comportamiento de muros confinados de mampostería de tabique ante carga lateral cíclica reversible. Se ensayaron dos muros de mampostería confinada elaborados a base de tabique rojo recocido de 50x130x240 mm y con dimensiones globales de 3.30 m de longitud y 2.40 m de altura. Los muros se construyeron con características iguales, excepto que uno de ellos incluyó tiras diagonales de fibra de vidrio cubriendo el 30% de la superficie aparente por ambos lados del muro. Los especímenes se ensayaron de acuerdo al protocolo de carga establecido en la normativa mexicana. Los efectos del refuerzo en el comportamiento del sistema se evaluaron en términos de los principales parámetros estructurales. Se concluyó que la resistencia lateral aumentó ligeramente (14.7%); el refuerzo no afectó a la rigidez lateral inicial, pero la degradación de rigidez fue más lenta en el muro con refuerzo; la ductilidad tuvo un ligero incremento (11.0%) debido al refuerzo; y la energía disipada del espécimen con refuerzo fue dos veces mayor que la del espécimen sin refuerzo.

PALABRAS CLAVE

Estudio experimental; mampostería confinada; refuerzo de GFRP; Fibra de vidrio

ABSTRACT

The increment of population in the world has produced the excessive use of land. In consequence, vertical construction for multi-family homes based on confined masonry walls are commonly chosen as a structural solution. The soil conditions and height of multi-family buildings make them susceptible to tensile stresses coming from lateral forces due to the seismic demands. Within this context, a feasible alternative to rehabilitate masonry and concrete structures is the use of composite materials as fiber reinforced polymers made of glass and/or carbon. There is evidence in the literature demonstrating that composite materials increase the diagonal tensile strength and deformation capacity of the masonry walls. The Mexican Building Code considers the use of composite materials as an option for the reinforcement of masonry walls. However, due to the lack of evidence providing technical support, the Mexican Building Code does not specify the appropriate amount and/or orientation for this type of retrofit material. Based on this discussion, in this study, the effects of glass fiber strip reinforcement on the behavior of confined masonry walls subjected to reversible cyclic lateral loading are evaluated. Two confined masonry walls were built and tested. The specimens were built using 50x130x240 mm clay brick units and the global dimensions of the walls were 3.30 m length and 2.40 m height. The walls were built with identical characteristics, except that one of them included diagonal strips of glass fiber placed on 30% of the apparent surface for both side of the wall. The specimens were tested in accordance with the test protocol recommended by the Mexican Building Code. The reinforcement effects on the behavior of the masonry walls were evaluated in term of their main structural parameters. It was concluded that lateral resistance lightly increased (14.7%); the reinforcement did not affect the initial lateral stiffness, but the stiffness degradation decreased slower in the reinforced wall; ductility had a light increase (11.0%) due to reinforcement; and dissipated energy of the specimen with reinforcement was twice greater than that of the wall without reinforcement.

KEYWORDS

Experimental study; confined masonry; GFRP reinforcement; Glass fiber

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Hipótesis	4
1.5 Justificación.....	4
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Marco conceptual	6
2.3 Estado del arte	8
2.4. Marco legal.....	15
2.4.1. Mortero	15
2.4.2. Concreto.....	15
2.4.3. Mampostería	15
3. METODOLOGÍA	16
3.1. Geometría de los muros.....	16
3.2. Propiedades de los materiales	17
3.2.1 Resistencia a compresión del mortero	17
3.2.2. Resistencia a compresión del concreto.....	18
3.2.3. Resistencia a tensión del concreto.....	19
3.2.4. Resistencia a compresión de pilas	20
3.2.5. Resistencia a compresión diagonal de muretes	21
3.3. Construcción de especímenes	21
3.4. Colocación del refuerzo GFRP en el muro MCT-FV30	22

3.5	Análisis de costos de aplicación de GFRP	26
3.6	Marco de carga	27
3.7	Instrumentación de los especímenes	28
3.8	Secuencia de carga.....	29
4.	RESULTADOS.....	31
4.1	Evolución de agrietamiento y curvas históricas.....	31
4.2	Curvas envolventes.....	39
4.3	Resistencia lateral.....	41
4.3.1	Resistencia de agrietamiento	41
4.3.2	Resistencia a la fluencia.....	41
4.3.3	Resistencia máxima	41
4.3.4	Resistencia ultima	41
4.3.5	Relación resistencia máxima/resistencia al agrietamiento	42
4.4	Rigidez lateral.....	42
4.4.1	Rigidez inicial.....	42
4.4.2	Degradación de la rigidez lateral	42
4.5	Distorsión y ductilidad	44
4.6	Capacidad de disipar energía	45
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	47
6.	REFERENCIAS	49
7.	GLOSARIO	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas de fibras.....	11
Tabla 2. Resultados de pruebas a compresión de cubos de mortero.....	17
Tabla 3. Resultados de pruebas a compresión en cilindros de concreto.....	18
Tabla 4. Resultados de pruebas a mampostería	21
Tabla 5. Análisis de Precio Unitario.....	26
Tabla 6. Valores de resistencias a los puntos críticos	42
Tabla 7. Rigidez inicial y degradación de rigidez.....	44
Tabla 8. Distorsiones y ductilidad de especímenes.....	45
Tabla 9. Energía disipada acumulada	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mampostería Romana (Gallegos, 2003).....	7
Figura 2. Fibra de vidrio (Servei Estació, 2024).....	9
Figura 3. Diagramas de esfuerzo-deformación de materiales compuestos y el acero (Fardis, 2009)	10
Figura 4. Configuración de los especímenes. a) muro sin refuerzo, b) muro con GFRP16	
Figura 5. Muestras de mortero	17
Figura 6. Prueba a compresión de cubos de mortero.....	18
Figura 7. Resistencia a compresión del concreto. a) Ensaye, b) Falla típica.....	19
Figura 8. Resistencia a tensión del concreto. a) Ensaye, b) Modo de falla	19
Figura 9. Resistencia a compresión de pilas a) Ensaye, b) Modo de falla	20
Figura 10. Resistencia a compresión diagonal en muretes a) Ensaye, b) Modo de falla	21
Figura 11. Construcción de especímenes. a) Anclaje de castillos, b) Colocación de tabique, c) Colado de castillos, d) Habilitado de dalas y losas, e) Colocación de plantilla y colado de dala-losa, f) Aplicación de pintura en especímenes	23
Figura 12. Colocación del refuerzo GFRP. a) Mezcla de resina y catalizador, b) aplicación de primer mano de resina, c) pegado de fibra de vidrio	25
Figura 13. Marco de carga a) Elevación, b) Vista transversal, c) Vista en planta	28
Figura 14. Equipo de registro de datos TDS-630	28
Figura 15. Ubicación de dispositivos de medición de desplazamientos	29
Figura 16. Protocolo de ensaye (NTCM, 2020)	30
Figura 17. Evolución del agrietamiento del espécimen MCT-SR.....	33
Figura 18. Curva histerética del espécimen MCT-SR.....	34
Figura 19. Evolución del agrietamiento del espécimen MCT-SR.....	36
Figura 20. Curva histerética del espécimen MCT-FV30	37
Figura 21. Patrón final de agrietamiento en los especímenes	37
Figura 22. Comparación de las curvas histeréticas	38
Figura 23. Curva envolvente del muro sin refuerzo (MCT-SR).....	40
Figura 24. Curva envolvente del muro con refuerzo (MCT-FV30)	40
Figura 25. Curva de rigidez normalizada – distorsión.....	43

Figura 26. Curvas de energía disipada acumulada – distorsión 46

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El sistema estructural mayormente empleado en la construcción de viviendas en México es el de mampostería confinada. Un muro de mampostería confinada es un elemento estructural constituido por la unión de piezas o unidades (tabique, block hueco, tabicón, etc.) con mortero. Su perímetro se encuentra confinado con elementos esbeltos de concreto reforzado y vaciados en el sitio, posterior a la construcción de la mampostería. A los elementos verticales se les denomina usualmente como castillos y a los horizontales como dalas, siendo estos elementos de dimensiones similares, y comparables al espesor del muro.

Las acciones sísmicas y los asentamientos diferenciales propician la presencia de tensiones diagonales en muros de mampostería. Consecuentemente, estas acciones son precursoras del agrietamiento en los muros. La resistencia a la tensión diagonal es una de las propiedades mecánicas con mayor impacto en el comportamiento de sistemas constructivos a base de mampostería. En diversos países del mundo se han realizado estudios experimentales sobre gran variedad de técnicas para el reforzamiento y rehabilitación de muros de mampostería, cuyo objetivo es aumentar su resistencia a la tensión diagonal y con ello mejorar su comportamiento ante fuerzas en el plano (Eshani et al, 1997; Velázquez et al, 1998; Velázquez-Dimas et al, 2000; Weng et al, 2004; Kalali et al, 2012; El-Diasity et al, 2015; Adulahad et al, 2020; Leal et al, 2020).

En la presente investigación se estudió, a través de pruebas de laboratorio, la contribución del refuerzo a base de tiras diagonales de fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés, Glass Fiber Reinforced Polymer) en el comportamiento de muros de mampostería confinada de tabique sujetos a carga lateral en el plano. Para ello se llevaron a cabo los ensayos de dos especímenes con características geométricas idénticas, y contruidos con los mismos materiales, pero con la diferencia de que uno de ellos incluyó un 30% del área del muro cubierta con GFRP como refuerzo. Cada muro se ensayó ante carga lateral cíclica reversible siguiendo el protocolo de ensaye establecido por las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras

de Mampostería del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México (NTCM, 2020). Para monitorear y registrar el comportamiento de los muros se instalaron medidores de carga y desplazamientos en distintos puntos de los especímenes de tal manera que fuera posible la determinación de la rigidez lateral, la resistencia, la distorsión, la ductilidad y la energía disipada. La contribución del GFRP en el comportamiento del sistema se definió por medio de la comparación de estos parámetros estructurales desarrollados por los especímenes ensayados.

1.2. Planteamiento del problema

A lo largo de la historia de México, el modelo principal de crecimiento urbano fue el de vivienda unifamiliar horizontal. Sin embargo, en las últimas décadas la concentración poblacional en las ciudades más importantes en el territorio mexicano ha propiciado la expansión vertical por medio de la creación de vivienda multifamiliar con la finalidad de disminuir el consumo de suelo (Sedesol, 2010).

El sistema constructivo más utilizado en nuestro país para vivienda multifamiliar de mediana altura es a base de muros de mampostería, generalmente confinada con dalas y castillos. Debido a su gran capacidad para resistir esfuerzos de compresión, los muros de mampostería son ideales para soportar cargas gravitacionales, lo que los vuelve en el sistema predilecto de construcción. No obstante, su deficiente capacidad para resistir esfuerzos de tensión diagonal, asociados a sollicitaciones como asentamientos diferenciales, sismo y viento los hacen susceptibles a presentar fallas estructurales ante dichas acciones (Meli, 1973).

Las evaluaciones realizadas a raíz del sismo de 1985 a través de inspecciones de campo y estudios de comportamiento de 23 edificaciones de mampostería, evidenció que el 56% presentaba agrietamiento originado principalmente por los hundimientos diferenciales, el uso de materiales de baja calidad o deterioro por humedad cuyo factor está relacionado con el intemperismo. Por otra parte, el 44% restante de los daños se atribuyó a una reducida cantidad de muros, en una o en ambas direcciones, asociado a una distribución asimétrica (Zeevaert, 2001).

Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Reglamento de Construcción de la Ciudad de México (NTCM, 2020) consideran el uso de materiales plásticos adheridos con resina como una alternativa de refuerzo y rehabilitación de muros de mampostería. Sin embargo, debido a la falta de evidencia experimental no se incluyen recomendaciones para el cálculo explícito de la resistencia a corte de muros reforzados con materiales compuestos, ni especificaciones sobre la cantidad requerida de fibra u orientación para alcanzar el máximo aprovechamiento de su capacidad de deformación.

El desarrollo de este proyecto contribuye a reducir la falta de evidencia experimental sobre los efectos del uso de la fibra de vidrio como alternativa de refuerzo para mejorar el comportamiento de los muros confinados de mampostería ante acciones laterales. Dichos efectos fueron cuantificados en términos del incremento a la resistencia lateral, la rigidez lateral, la capacidad de disipar energía, la ductilidad y la capacidad de deformación.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estudiar los efectos del refuerzo a base de tiras diagonales de GFRP en el comportamiento de muros confinados de tabique ante carga lateral cíclica reversible aplicado en un 30% de su superficie aparente.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Estimar el efecto del refuerzo de GFRP en la resistencia lateral de muros de mampostería de tabique sometidos a carga lateral mediante pruebas experimentales.
2. Evaluar el efecto del refuerzo de GFRP en la rigidez lateral de muros de mampostería de tabique sometidos a carga lateral mediante pruebas experimentales.
3. Calcular el efecto del refuerzo de GFRP en la ductilidad de muros de mampostería de tabique sometidos a carga lateral mediante pruebas experimentales.

4. Determinar el efecto del refuerzo de GFRP en la capacidad de disipar energía de muros de mampostería de tabique sometidos a carga lateral mediante pruebas experimentales.

1.4. Hipótesis

La implementación de refuerzo a base de tiras diagonales de GFRP aplicadas en un 30% de la superficie aparente del muro contribuye en el incremento de la resistencia lateral y de la capacidad de deformación del muro.

1.5 Justificación

En la actualidad, las viviendas en México son construidas mayormente mediante el uso de muros de mampostería, debido a sus características estructurales y bajo costo. Es importante destacar que la mampostería representa alrededor del 50% del volumen de construcción de una vivienda de interés social. Existe evidencia (Leal-Graciano et al, 2020; Adulahad et al, 2020; El-Diasity et al, 2015; Velázquez et al, 2012; Kalali et al, 2012; Quiñonez et al, 2011; Weng et al, 2004) de que el uso de materiales compuestos es una buena alternativa para el refuerzo y la rehabilitación en muros de mampostería, ya que aumentan su resistencia a cortante y su ductilidad, además de que no incrementa su peso y presenta relativa facilidad en su aplicación. A pesar de dicha evidencia, todavía no se cuenta con suficiente conocimiento técnico que permita generar especificaciones y recomendaciones explícitas para el diseño de muros reforzados con fibras. Las NTCM (2020) hacen mención del uso de materiales plásticos, por ejemplo, la fibra de vidrio, como una alternativa de refuerzo y rehabilitación para muros de mampostería. Sin embargo, no se especifica el cálculo explícito de la contribución del refuerzo en la resistencia a corte del muro, ni se sugiere alguna configuración o cantidad de material compuesto óptima que conduzca a un mejor comportamiento del sistema.

En esta investigación se estudió, de manera experimental, el comportamiento de muros de tabique sin y con refuerzo a base de tiras diagonales colocadas en un 30% de su área aparente, los cuales fueron sometidos a carga lateral cíclica, con la finalidad de evaluar su desempeño en términos de resistencia lateral, rigidez, ductilidad y capacidad de disipar energía.

La investigación se encuentra alineada a los Programas Nacionales Estratégicos (PRONACES) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), específicamente al rubro de vivienda, puesto que contribuye a encontrar nuevas alternativas de construcción de una vivienda adecuada, sustentable y en equilibrio con el entorno natural, que amplía las oportunidades de grupos vulnerables y que propicia, además de una vida digna, el desarrollo de una economía social, solidaria y estable.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

A lo largo de la historia, una de las necesidades humanas más importantes ha sido encontrar algún sitio que pueda brindar calor, protección y seguridad contra las inclemencias de la naturaleza. Existe la probabilidad de que, hace alrededor de 15,000 años, algún nómada al no encontrar un lugar natural para resguardarse haya utilizado la mampostería de la época con la finalidad de realizar una construcción segura y duradera.

En relación con los avances del uso de la mampostería alrededor del mundo podemos encontrar en las Islas Aran, Irlanda y Catal Huyuk el uso del barro como medio de unión entre piedras naturales irregulares. Por otra parte, en aquellas zonas con escasez de piedras naturales, como el norte del Perú, predominó la elaboración de unidades de mampostería fabricadas por el hombre a partir de una masa de barro secada al sol como método de sustitución. Para la construcción de mampostería, un avance sustantivo fue el uso del molde, el cual estaba constituido por un marco de madera rústico. Con el uso del molde se logró la producción rápida de unidades con dimensiones prácticamente iguales. La primera construcción a base de unidades de barro formadas con molde apareció en el año 2900 a.C. en la ciudad de Uruk, Sumeria, cuyo templo presenta una apariencia escalonada entre adobes unidos con capas de betún. Algo semejante ocurrió en México con la edificación de la pirámide del sol de Teotihuacan, construida hacia el año 500 a.C. y constituida de un núcleo masivo de adobes cuatrapeados. También, es importante destacar a las construcciones mayas como la pirámide de Comalcalco en el estado de Tabasco, que se encuentra edificada a base de piezas de arcilla moldeada y cocida muy similar a la utilizada en la actualidad. En este tipo de construcción se puede observar el uso de mortero aglutinante colocado uniformemente y un correcto cuatrapeado de las piezas de arcilla permitiendo una edificación de gran magnitud para su época (Gallegos y Ramirez, 2003).

En Egipto y Grecia, se construyeron estructuras importantes con piedra recta. El uso del arco era inexistente, por lo tanto, como resultado, esta arquitectura tenía posibilidades de espacio interior limitadas debido a la baja resistencia a la tensión de los materiales.

La lujosa arquitectura exterior se introdujo en Grecia, que contaba con el mejor mármol para lograrlo. En Roma, se utilizaron en algunas obras piedra procedente de las mejores canteras de Egipto y mármol griego, en algunos casos se utilizaron técnicas sumerias como la implementación del adobe. La nueva racionalidad consistió principalmente en el desarrollo de diferentes sistemas de construcción de muros más económicos y fáciles de construir, especialmente utilizando nuevos morteros de cal (Figura 1).

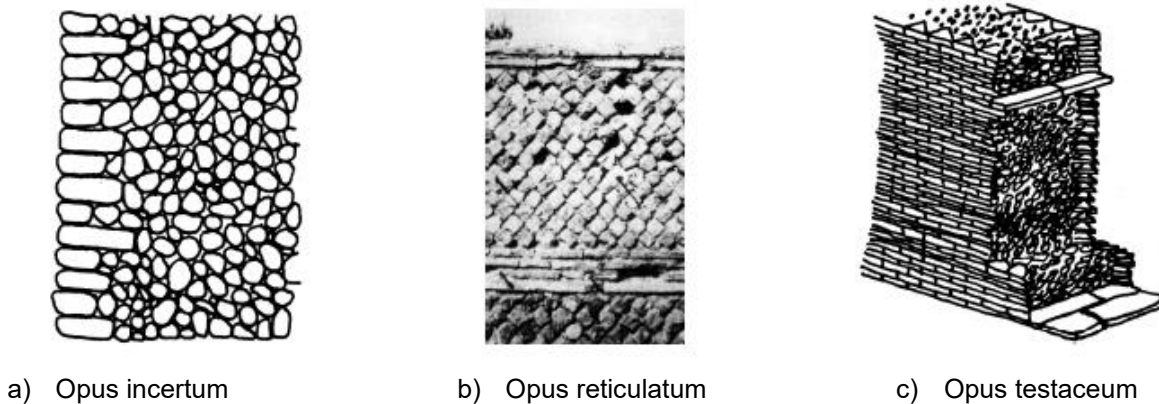


Figura 1. Mampostería Romana (Gallegos, 2003)

La combinación de las tres sustancias descritas por Vitruvio (aglomerante hidráulico, agregado grueso y agua) es lo que hoy llamamos hormigón. Los inventos e innovaciones romanas significaron una verdadera revolución tecnológica en la construcción, con efectos importantes como: permitir la construcción de cimientos más sólidos, simplificar la construcción de muros y arcos, se dio libertad al desarrollo de la tecnología de bóvedas y cúpulas, y por último, facilitar la construcción de aberturas parciales o totales para muros con la utilización de arcos y bóvedas (Gallegos y Ramirez, 2003).

El panteón romano es una construcción cuya razón es la combinación de manera consistente de creatividad arquitectónica y estructural a través de la aplicación avanzada de nuevas técnicas de construcción, demostrando la notable dependencia romana del mortero y el hormigón.

Desde el siglo V hasta el siglo XIX, el progreso en la tecnología europea respecto al desarrollo de la mampostería se detuvo debido al paro total de la fabricación de ladrillos; la elaboración de mortero y concreto se detuvo en su camino de innovación, fue hasta

siglos posteriores cuando Smeaton retomó estos materiales hasta llevarlos a su cúspide fundando la ingeniería civil moderna (Gallegos y Ramirez, 2003).

En 1796 se realizó la patente del cemento romano que técnicamente se trataba de cal hidráulica. Años después, en 1827, se inventó el cemento portland. Posteriormente, entre 1850 y 1870 se inventaron y patentaron los bloques de hormigón, ladrillo silico- calcáreo y el hormigón armado (Gallegos y Ramirez, 2003).

El famoso ingeniero británico Brunel, en 1813, propuso el reforzamiento de la mampostería utilizando barras de hierro forjadas, dando lugar a lo que hoy conocemos como mampostería reforzada. Dicho material fue utilizado en 1925 para la construcción del túnel del Támesis, no obstante, en 1889 el ingeniero francés Pail Cautensin ideó un método para el reforzamiento de edificios de mampostería (Gallegos y Ramirez, 2003).

En el siglo XX se presentaron importantes transformaciones dentro de la tecnología como en los hábitos y costumbres de la vida de las personas, lo cual ha influido directamente en la tipología de vivienda. El primer multifamiliar construido fue el conjunto Carl Max en Viena en el año de 1927 seguido del multifamiliar integral de Le Corbusier en 1946 en Marsella. En los años ochenta, se identificó que grandes edificaciones de multifamiliares comenzaron a presentar deficiencias estructurales. En México, el sismo de 1985 dejó en claro que el factor de seguridad debe ser prioridad para los esquemas de complejos multifamiliares debido a su amplia importancia habitacional (Gallegos y Ramirez, 2003).

2.3 Estado del arte

Los materiales compuestos se han utilizado en la industria aeroespacial desde hace más de treinta años. El uso de materiales compuestos para reforzar y modernizar estructuras se desarrolló originalmente en Suiza (Meier,1992) con la finalidad de aumentar la durabilidad de las vigas de hormigón armado. Actualmente, el uso de materiales compuestos es objeto de investigación y quienes lo han realizado (Eshani et al, 1997; Triantafillou, 1998; Elgawady, 2005) han concluido que son adecuados para reparar o reforzar estructuras de mampostería debido a que permite mejorar el confinamiento cuyo resultado se traduce en un incremento de la resistencia a flexión fuera del plano,

resistencia a cortante en el plano, ductilidad y no presenta adición al peso de la edificación debido a su aplicación.

Los polímeros reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés), son fibras de alta resistencia incrustadas en una matriz plástica. La fibra puede estar hecha de carbono, vidrio (Figura 2), boro, nailon y otras. Algunas de las fibras utilizadas en el rubro de la construcción han sido la fibra de vidrio, de carbono y aramid.



Figura 2. Fibra de vidrio (Servei Estació, 2024)

Las fibras se encuentran constituidas de filamentos largos y continuos lo cual proporcionan una alta resistencia a la tensión en la dirección longitudinal y exhiben un comportamiento elástico lineal hasta el punto de falla. En la Figura 3 se muestran las curvas esfuerzo – deformación de diferentes materiales compuestos y se compara con la del acero.

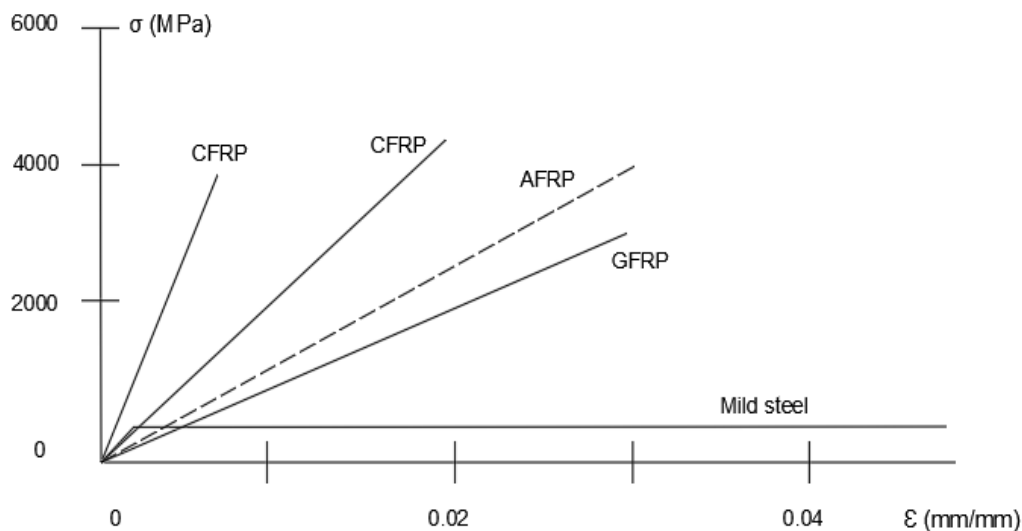


Figura 3. Diagramas de esfuerzo-deformación de materiales compuestos y el acero (Fardis, 2009)

El uso de los FRP se ha extendido a las industrias de la medicina, el deporte, el automovilismo y la industria naval. En los últimos años, se ha intensificado la investigación sobre su potencial de aplicación en la industria de la construcción.

La función de la fibra es absorber las fuerzas, y la función de la matriz plástica es distribuir la carga por toda la fibra y protegerla del medio ambiente. La matriz mayormente utilizada son resinas de poliéster, vinilester o epoxica. Si la fibra es de vidrio, carbono o aramid, los compuestos se denominan GFRP, CFRP, AFRP, respectivamente. El FRP en comparación con los materiales tradicionales tiene la ventaja de ser duradero, ligero y resistente a los efectos ambientales. Debido a que este tipo de material presenta un peso ligero, sus técnicas de uso para refuerzo y rehabilitación son bastante sencillas y no requieren restricciones en el espacio de aplicación. En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas nominales de algunas fibras.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de fibras (Besednjak, 2005)

Tipo	Vidrio E	Vidrio R/S	Vidrio C
Resistencia a la tracción (GPa)	3.4-3.5	3.4-4.6	3.1
Modulo elástico (Gpa)	72-73	85-87	71
Densidad (Kg/m ³)	2600	2500-2530	2450
Alargamiento a la rotura (%)	3.3-4.8	4.2-5.4	3.5
Resistencia especifica (GPa*cm ³ /g)	1.3-1.35	1.7-1.85	1.3
Modulo E especifico (GPa*cm ³ /g)	27.7-28.2	34-34.9	29
Transmisión térmica (K)	5	4-5.1	7.2
Diámetro del filamento (µm)	8-20	10	20
Tipo	Carbono HT	Carbono HM	Aramid (Kevlar 29)
Resistencia a la tracción (GPa)	2.6-5	2-3.2	2.8-3
Modulo elástico (Gpa)	228-238	350-490	58-80
Densidad (Kg/m ³)	1740-1830	1790-1910	1390-1440
Alargamiento a la rotura (%)	1.2-2	0.4-0.8	3.3-4.4
Resistencia especifica (GPa*cm ³ /g)	1.5-2	1.1-1.7	1.9-2.2
Modulo E especifico (GPa*cm ³ /g)	127-134	190-260	40-56
Transmisión térmica (K)	-0.1 a -0.7	-0.5 a -1.3	-2 a -6
Diámetro del filamento (µm)	7-8	6.5-8	12

Una desventaja del FRP es que la resina es sensible a los rayos UV, por lo tanto, debe protegerse de la luz solar directa. Otra desventaja del FRP es que la resina presenta degradación bajo calor, aunque funciona bien en la mayoría de las condiciones de servicio de las estructuras. Sayed-Ahmed (1998) demostró que la resina de tendones de fibras de carbono se evapora en un lapso de 2 horas a una temperatura de 500 °C. Para evitar este comportamiento el FRP puede ser cubierto con retardantes de fuego.

El FRP utilizado en la construcción se encuentra en diferentes presentaciones como mantas, mallas, laminas, tendones y barras de refuerzo. El uso exitoso de FRP en la construcción implica un adecuado análisis del comportamiento estructural de los elementos, así como la correcta selección del tipo de FRP, adhesivo y preparación de la superficie.

La investigación sobre el uso de FRP en refuerzo y rehabilitación estructural se ha centrado inicialmente en estructuras de concreto reforzado, sin embargo, recientemente se ha extendido hasta llegar a estructuras de mampostería. Las investigaciones sobre FRP han sido dirigidas a estructuras de mampostería con el objetivo de reducir el comportamiento frágil e incrementar la resistencia del sistema para mejorar el comportamiento sísmico.

Velázquez et al (1998), Eshani et al (1999) y Velázquez-Dimas et al (2000) informaron los resultados de un programa experimental realizado en Estados Unidos con el fin de identificar los modos de falla de muros de mampostería reforzados con tiras de materiales compuestos. Las variables investigadas fueron el porcentaje de material compuesto utilizado sobre la superficie de la pared y su relación de aspecto. Probaron muros de mampostería de tamaño medio construidos con piezas de ladrillo sólido a base de arcilla, las dimensiones de los especímenes fueron: tres de 1.22 m x 0.7 m, tres de 1.22 m x 1.42 m y uno de 1.22 m x 1.74 m. El refuerzo fue colocado en ambas caras con tiras de GFRP con una orientación vertical, la carga aplicada fue fuera del plano. A partir de los resultados de las pruebas y el comportamiento observado, los investigadores demostraron que: 1) se identificaron cinco modos de falla, 2) la resistencia máxima a la flexión aumentó de manera significativa, 3) la deflexión de los muros aumentó 14 veces en comparación con la permisible, 4) los muros presentaron un comportamiento inelástico, por lo tanto, el GFRP es una buena alternativa para el refuerzo de muros de mampostería sujetos a carga fuera del plano.

Weng et al (2004) realizaron ensayos en muros de mampostería a base de tabique colocando refuerzo de GFRP en su totalidad en ambos lados del espécimen, con el objetivo de analizar el beneficio que podría aportar al sistema la utilización de materiales compuestos como la fibra de vidrio. Los resultados obtenidos concluyeron que la capacidad última de cortante es directamente proporcional al esfuerzo de compresión. Además, observaron que el GFRP contribuye directamente en la integridad del muro y a la disipación de energía.

Kalali et al (2012) estudiaron el comportamiento de muros de tabique con abertura central reforzados con tiras de GFRP ante carga lateral. El objetivo fue demostrar que las tiras

de GFRP colocadas en sentido de cruz, cuadrícula y una combinación de ambas mejoran la resistencia, la deformación y capacidad de disipar energía del sistema. En esta investigación se realizaron ensayos experimentales en muros sin refuerzo y con refuerzo mediante aplicación de carga lateral cíclica. El estudio concluyó que el uso de GFRP como refuerzo en muros de mampostería simple es efectivo mejorando su comportamiento ante cargas sísmicas.

En México, Velázquez et al (2012) realizaron un estudio sobre muros confinados de tabique y block con una ventana central con el fin de probar la eficiencia del uso de GFRP como método de rehabilitación y reforzamiento. Se ensayaron tres condiciones diferentes como lo fueron un muro sin refuerzo, con refuerzo vertical de fibra y un muro con presencia de daños rehabilitado con tiras diagonales de GFRP. Las condiciones anteriormente descritas fueron evaluadas ante la acción simultánea de carga vertical constante y carga lateral cíclica reversible, demostrando cambios considerables en el comportamiento lateral entre los elementos no reforzados y reforzados. La investigación obtuvo como resultado que el GFRP utilizado como método de rehabilitación y reforzamiento es totalmente eficiente, debido a que no solo restaura la capacidad de resistencia y de deformación del elemento, sino que también estos resultados pueden lograrse en aquellos muros que han sido construidos de forma inapropiada con base a las especificaciones del código de construcción mexicano.

Por otro lado, El-Diasity et al (2015) llevaron a cabo un estudio cuyo propósito fue comprobar los beneficios de la implementación de GFRP en muros de mampostería confinada, a través de pruebas experimentales en muros con diferentes configuraciones de fibra de vidrio: en muros sólidos, muros con aberturas tipo ventana y puerta, además el refuerzo fue colocado en X, en la esquina y con una cobertura total del área. Los resultados confirmaron que el empleo de GFRP permite un aumento de la resistencia lateral entre un 25%-35% con un incremento considerable de la ductilidad. Por otra parte, la capacidad de disipación de energía en los muros crece entre un rango de 33%-85%.

Más tarde en Bulgaria, Adulahad et al (2020) realizaron un estudio experimental sobre el comportamiento de muros de mampostería confinada para estimar el desempeño del uso de GFRP como dispositivo de refuerzo. Las pruebas se ejecutaron por medio de un marco

de carga que aplicaba una carga de gravedad constante y un incremento paulatino de carga lateral en el plano del muro hasta alcanzar la falla. Los ensayos se realizaron a un muro sin refuerzo que posteriormente fue rehabilitado y reforzado con una configuración de GFRP en X y vertical para posteriormente ser ensayado de nuevo. Se comparó el comportamiento del muro no reforzado y el del reparado. Los resultados indicaron que el sistema restaurado con GFRP obtuvo un incremento de la capacidad de resistencia lateral y disipación de energía.

Leal et al (2020) presentaron los resultados de pruebas experimentales sobre muros de mampostería confinada sujetos ante carga lateral cíclica. La finalidad de la investigación fue corroborar la viabilidad del uso de GFRP como alternativa de refuerzo en el perímetro de aberturas tipo ventana en muros de tabique. Los especímenes contaron con diversas condiciones de refuerzo en esa zona. Se evaluaron cuatro tipos de muros: el primero sin refuerzo, el segundo con dalas y castillos de concreto en el perímetro de la abertura, el tercero con GFRP alrededor de la abertura y el cuarto fue el primer muro rehabilitado con GFRP y ensayado de nuevo. Los resultados de las pruebas indicaron que el muro reforzado con GFRP en el perímetro de la abertura contó con la misma resistencia y rigidez que aquel muro con el sistema tradicional de refuerzo con dalas y castillos. El muro que fue rehabilitado presentó un buen comportamiento al recuperar su resistencia lateral y capacidad de deformación. Sin embargo, no recuperó su rigidez lateral al ser rehabilitado con GFRP.

Corrales (2023) realizó el ensaye de dos muros confinados de block con el objetivo de investigar la contribución del refuerzo GFRP en su comportamiento ante carga lateral cíclica reversible. Para cumplir tal objetivo, se aplicó en uno de los muros refuerzo a base de tiras de GFRP inclinadas cubriendo un 50% de su superficie. Los resultados demostraron que el refuerzo de GFRP incrementó significativamente la resistencia lateral, puesto que el muro con refuerzo tuvo una resistencia 1.92 veces mayor que el muro sin refuerzo. Además, el refuerzo contribuyó a aumentar la capacidad de disipar energía del sistema, pues el muro reforzado disipó 3.68 veces más que el muro sin refuerzo.

2.4. Marco legal

El programa experimental desarrollado en este proyecto se realizó siguiendo las especificaciones y métodos establecidos en la normativa mexicana. Los ensayos de los especímenes principales (muros confinados) se llevaron a cabo siguiendo el protocolo de ensayo establecido en el Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM, 2020); mientras que las pruebas a los materiales se realizaron aplicando las normas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) correspondientes. A continuación, se puntualizan las normas utilizadas para cada material ensayado.

2.4.1. Mortero

- Cemento para albañilería (mortero), especificaciones y métodos de ensayo (NMX-C-021-ONNCCE 2015)
- Determinación de la resistencia a compresión en cementantes hidráulicos (NMX-C-061-ONNCCE 2015)

2.4.2. Concreto

- Elaboración y curado de especímenes de ensayo (NMX-C-159-ONNCCE 2016)
- Determinación del revenimiento en el concreto fresco (NMX-C-156-ONNCCE 2010)
- Concreto fresco, muestreo (NMX-C-161-ONNCCE 2013)
- Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes, métodos de ensayo (NMX-C-083-ONNCCE 2014)

2.4.3. Mampostería

- Obtención de la resistencia a compresión y resistencia a compresión diagonal de la mampostería mediante el ensayo de pilas y muretes de acuerdo a lo especificado en la norma (NMX-C-464-ONNCCE 2010).

3. METODOLOGÍA

3.1. Geometría de los muros

Los muros de mampostería confinada fueron elaborados a base de tabique de 50x130x240 mm y con juntas de mortero estructural tipo II (según la clasificación de las NTCM, 2020) de 15 mm de espesor. Las dimensiones globales de los muros fueron de 3.30 m de longitud y 2.40 m de altura, confinados con castillos de 130 x 150 mm y una dala de cerramiento de 130 x 200 mm. Sobre cada uno de los muros se construyó una losa de concreto reforzado con dimensiones de 500 mm de ancho y 100 mm de espesor. Las características de los elementos que componen a los especímenes son similares a aquellos que se usan en un edificio de vivienda típico de la región Noroeste de México. Se construyeron dos especímenes con las mismas características, sin embargo, uno de ellos no fue reforzado con ningún tipo de material (muro de control), el cual fue denominado MCT-SR (Figura 4a); mientras que el otro espécimen se reforzó con GFRP cubriendo un 30% de la superficie aparente de muro, el cual se denominó MCT-FV30 (Figura 4b). El refuerzo se colocó por forma de tiras diagonales de 100 mm de ancho sobre ambas caras del muro. La dirección de las tiras de GFRP colocadas en la cara frontal fue opuesta a la de las tiras de la cara posterior, con el propósito de considerar que la carga lateral se aplicó de manera alternada. La cantidad de fibra se midió como el área del muro cubierta por el GFRP entre el área total de la cara del muro.

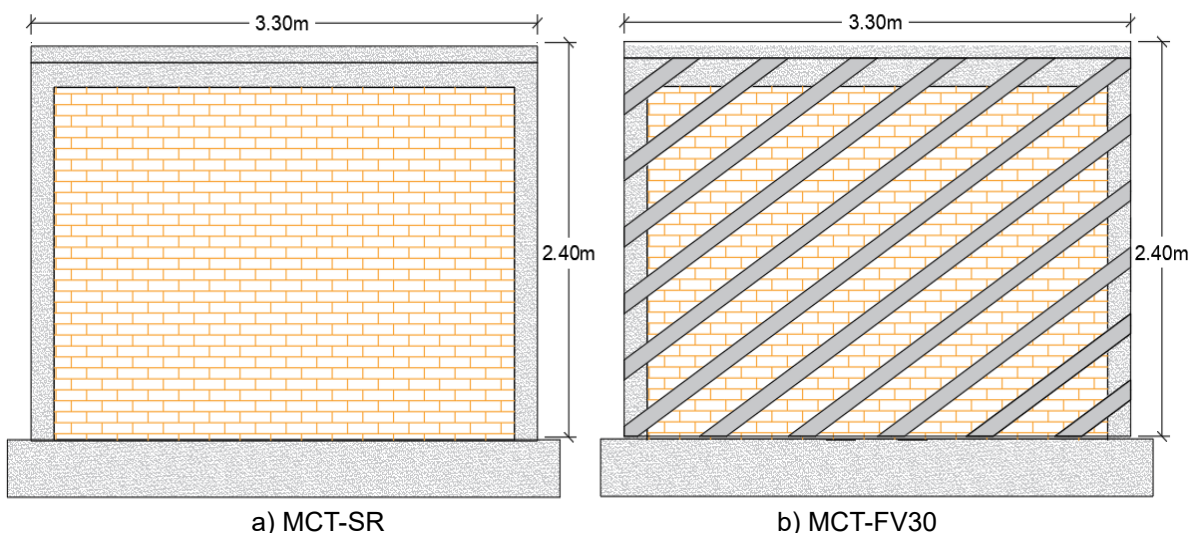


Figura 4. Configuración de los especímenes. a) muro sin refuerzo, b) muro con GFRP

3.2. Propiedades de los materiales

3.2.1 Resistencia a compresión del mortero

La elaboración de muestras de mortero, así como la determinación de la resistencia a compresión (f_j) se llevó a cabo dando seguimiento al procedimiento establecido por la Norma NMX-C-061-ONNCCE-2015. Por cada una de las 14 mezclas de mortero elaboradas se obtuvo una muestra representativa de mortero, constituida de tres cubos con dimensiones de 50 mm por lado (Figura 5), dicho número de muestras son representativas de la cantidad de mezclas de mortero realizadas para la construcción de los muros de mampostería.



Figura 5. Muestras de mortero

Con base a las recomendaciones de la NTCM (2020), se realizó la dosificación de los materiales empleados en la elaboración de mortero. Se utilizó la proporción 1-1/4-2.5 partes de cemento-cal-arena, respectivamente. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, incluyendo la resistencia a compresión promedio (\bar{f}_j), la desviación estándar (d_{est}), y el coeficiente de variación (c_v).

Tabla 2. Resultados de pruebas a compresión de cubos de mortero

Espécimen	Numero de muestras (Cubos)	\bar{f}_j (MPa)	d_{est} (MPa)	c_v (%)
MCT-SR	14 (42)	15.36	2.05	13.06
MCT-FV30				

En la Figura 6, se presenta el ensaye a compresión de las muestras de mortero mediante el uso de la prensa hidráulica la cual permite registrar de manera digital el proceso de carga monotónica. Como resultado general de dichos ensayos se obtuvo una resistencia de diseño del mortero $f_j' = 10.24$ MPa, por lo cual se clasifica como un mortero estructural tipo II, según la clasificación de las NTCM (2020).



Figura 6. Prueba a compresión de cubos de mortero

3.2.2. Resistencia a compresión del concreto

Durante la elaboración de los muros de mampostería se obtuvieron dos muestras de concreto: una durante el colado de los castillos y otra durante la construcción de las dalas y losas. Las muestras de concreto fueron representativas del concreto usado en cada tipo de elemento estructural, obteniendo en cada muestra tres cilindros con dimensiones de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. La resistencia a compresión del concreto (f_c') se obtuvo de los ensayos de cilindros con base a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2014 (Figura 7). Los resultados de las pruebas a compresión de los cilindros se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de pruebas a compresión en cilindros de concreto

Especimen	Concreto de castillos				Concreto de dalas y losas			
	No. de Cilindros	f_c' (MPa)	d_{est} (MPa)	c_v (%)	No. de Cilindros	f_c' (MPa)	d_{est} (MPa)	c_v (%)
MCT-SR MCT-FV30	3	21.60	0.72	3.34	3	27.03	0.37	1.37



a)



b)

Figura 7. Resistencia a compresión del concreto. a) Ensaye, b) Falla típica

3.2.3. Resistencia a tensión del concreto

La resistencia a tensión del concreto (f'_t) se determinó con base a lo establecido por la NMX-C-163-ONNCCE-1997. Para la realización de la prueba a compresión diametral se obtuvieron tres cilindros de concreto con 150 mm de diámetro y 300 mm de longitud. La ejecución de la prueba fue a través del uso de equipo especializado para dicha prueba y la prensa universal. Se obtuvo como resultado un valor promedio de la resistencia a tensión de concreto igual a 2.74 MPa. En la Figura 8 se muestran la ejecución de dicha prueba y el modo de falla de los cilindros.



a)



b)

Figura 8. Resistencia a tensión del concreto. a) Ensaye, b) Modo de falla

3.2.4. Resistencia a compresión de pilas

La resistencia a compresión de la mampostería (f_m) se obtuvo mediante el ensaye de pilas a compresión conforme lo establecido por la Norma mexicana NMX-464-ONNCCE-2010. Se ensayaron tres pilas elaboradas con el mismo tipo de mortero y piezas utilizado durante la construcción de los especímenes principales. Las pilas fueron hechas con nueve piezas sobrepuestas unidas con mortero (Figura 9). La relación altura/espesor de las pilas fue de 4.38. Para la distribución de la carga sobre las pilas se utilizó yeso como material de cabeceo. Los resultados de los ensayes a compresión de pilas se presentan en la Tabla 4.



a)



b)

Figura 9. Resistencia a compresión de pilas a) Ensaye, b) Modo de falla

3.2.5. Resistencia a compresión diagonal de muretes

La obtención de la resistencia a compresión diagonal (v_m) de muretes se realizó por medio del procedimiento descrito en la norma NMX-464-ONNCCE-2010. Se ensayó una muestra constituida de 5 muretes, los cuales se conformaron de 9 hiladas formadas de dos y media piezas, y juntas de mortero de 15 mm de espesor. Consecuentemente, los muretes tuvieron dimensiones globales promedio de 575 mm de altura y 615 mm de longitud (Figura 10). En la Tabla 4 se muestran los resultados de los ensayos a compresión diagonal de los muretes.



Figura 10. Resistencia a compresión diagonal en muretes a) Ensaye, b) Modo de falla

Tabla 4. Resultados de pruebas a mampostería

Especimen	No. de pilas	f_m (MPa)	d_{est} (MPa)	c_v (%)	No. de Muretes	v_m (MPa)	d_{est} (MPa)	c_v (%)
MCT-SR MCT-FV30	3	4.04	0.18	4.5	5	0.53	0.05	10.16

3.3. Construcción de especímenes

La construcción de especímenes se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Culiacán (UAS). Los trabajos preliminares se

desarrollaron en la cimentación de concreto existente al realizar su demolición parcial en puntos específicos para crear dos aberturas de 200 mm x 200 mm x 300 mm, las cuales sirvieron para anclar el armado de los castillos (Figura 11a). El concreto utilizado en las aberturas fue de un $f'_c = 24.51$ MPa. El pegado de tabique se llevó a cabo en dos partes: el primer día de pegado se construyeron ambos muros de tabique hasta 1 metro de altura (Figura 11b); en el segundo día se culminó con la colocación de las piezas logrando una elevación de 2.20 metros de altura. Para el confinamiento lateral de los muros de tabique, se colaron castillos de 130 mm x 150 mm con un concreto $f'_c = 21.6$ MPa (Figura 11c). El confinamiento superior se logró mediante una dala de cerramiento la cual se coló monolíticamente con una losa de concreto con un $f'_c = 27.45$ MPa (Figura 11d). Durante el proceso del colado, se utilizaron plantillas de acero para formar dos hileras de orificios en las losas de 1 pulgada de diámetro y separados a cada 250 mm (Figura 11e). Dichos orificios se formaron con el objetivo de permitir el atornillado de una viga de acero usada para transmitir de carga vertical y lateral a los especímenes. Una vez culminados los trabajos de albañilería se procedió a la colocación de la fibra de vidrio en uno de los especímenes. El proceso de colocación de las tiras de fibra de vidrio se describe a detalle en la sección 3.4. Finalmente, los especímenes se pintaron de color blanco (Figura 11f) con el propósito de mejorar la visualización del agrietamiento desarrollado durante su ensaye.

3.4. Colocación del refuerzo GFRP en el muro MCT-FV30

En seguimiento al objetivo principal de la investigación, el cual consiste en estudiar los efectos del refuerzo a base GFRP en el comportamiento de muros confinados de mampostería de tabique ante carga lateral cíclica reversible, se colocaron tiras de fibra de vidrio adheridas a la superficie aparente de uno de los especímenes (MCT-FV30). Se colocaron tiras de fibra de vidrio de 100 mm de ancho, con la cantidad y separación necesaria para cubrir un 30% del área aparente por ambos lados del muro. De tal manera que las diferencias observadas en el comportamiento de los muros son atribuidas directamente al uso de fibra de vidrio, ya ésta es la única variable entre ambos especímenes.

El material de refuerzo usado en este proyecto se identifica como material compuesto. Los materiales compuestos son aquellos que se forman por la unión de dos o más materiales, con el propósito de conseguir propiedades físicas y mecánicas que no son posible obtener en los materiales originales. En todos los materiales compuestos se pueden identificar el agente reforzante y el material matriz.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 11. Construcción de especímenes. a) Anclaje de castillos, b) Colocación de tabique, c) Colado de castillos, d) Habilitado de dalas y losas, e) Colocación de plantilla y colado de dala-losa, f) Aplicación de pintura en especímenes

El agente de refuerzo utilizado en este estudio fue fibra de vidrio, la cual se encuentra conformada por filamentos de tamaño pequeño y entrelazado en direcciones ortogonales. Debido a su apariencia, este tipo de fibra es comúnmente identificada en el mercado con el nombre de “fibra en petatillo”. De acuerdo con el proveedor, el peso por metro cuadrado de fibra es 8.44 N. Como material matriz, se usó resina poliéster PP 70-60 insaturada, ortoftálica de reactividad media preacelerada, cuyas aplicaciones son en fabricación y/o reparación de varios artículos de plástico reforzado con fibra de vidrio utilizando los procesos de moldeo manual. Para su endurecimiento de la resina poliéster, se requiere de un catalizador. La proporción utilizada de resina/catalizador fue la recomendada por el proveedor, consistente de 0.205 N de catalizador por cada 9.81 N de resina (Figura 12a).

El procedimiento de colocación del material compuesto (GFRP) consistió en los siguientes pasos. Primero: se identificó y delimitó el área donde se aplicó la fibra; para delimitar el área se utilizó cinta tipo masking tape. Segundo: se cortó la fibra de vidrio para lograr tiras de igual tamaño que las zonas previamente delimitadas. Tercero: Con ayuda de un cepillo y brocha, se limpió la zona donde se aplicó el producto sin realizar ninguna alteración de la superficie como relleno de huecos y/o afine de salientes del mortero o irregularidades del tabique. Cuarto: se aplicó una primera mano de resina poliéster con la finalidad de poder cerrar los poros de la superficie de trabajo; dicha aplicación se dejó reposar por un periodo de 24 h (Figura 12b). Quinto: se aplicó una segunda mano abundante de resina, dejado secar por unos minutos hasta tener una textura pegajosa. Sexto: con la superficie aún pegajosa, se pegaron las tiras de GFRP y se aplicó una tercera capa de resina de manera que la fibra se impregne y quede adherida a la superficie (Figura 12c). El refuerzo se colocó una vez que se tuvieron todas las tiras recortadas, con el objetivo de hacer más rápida la aplicación de resina y evitar su endurecimiento. Séptimo: finalmente, se pintó de blanco en la zona del muro donde no tuvo refuerzo con el propósito de identificar eficientemente las grietas durante el ensaye.



a)



b)



c)

Figura 12. Colocación del refuerzo GFRP. a) Mezcla de resina y catalizador, b) aplicación de primer mano de resina, c) pegado de fibra de vidrio

3.5 Análisis de costos de aplicación de GFRP

En la Tabla 5 se muestra el análisis de los gastos efectuados por el alumno, los rendimientos son registro de la duración y alcance obtenido durante el periodo de construcción y aplicación de fibra en el muro.

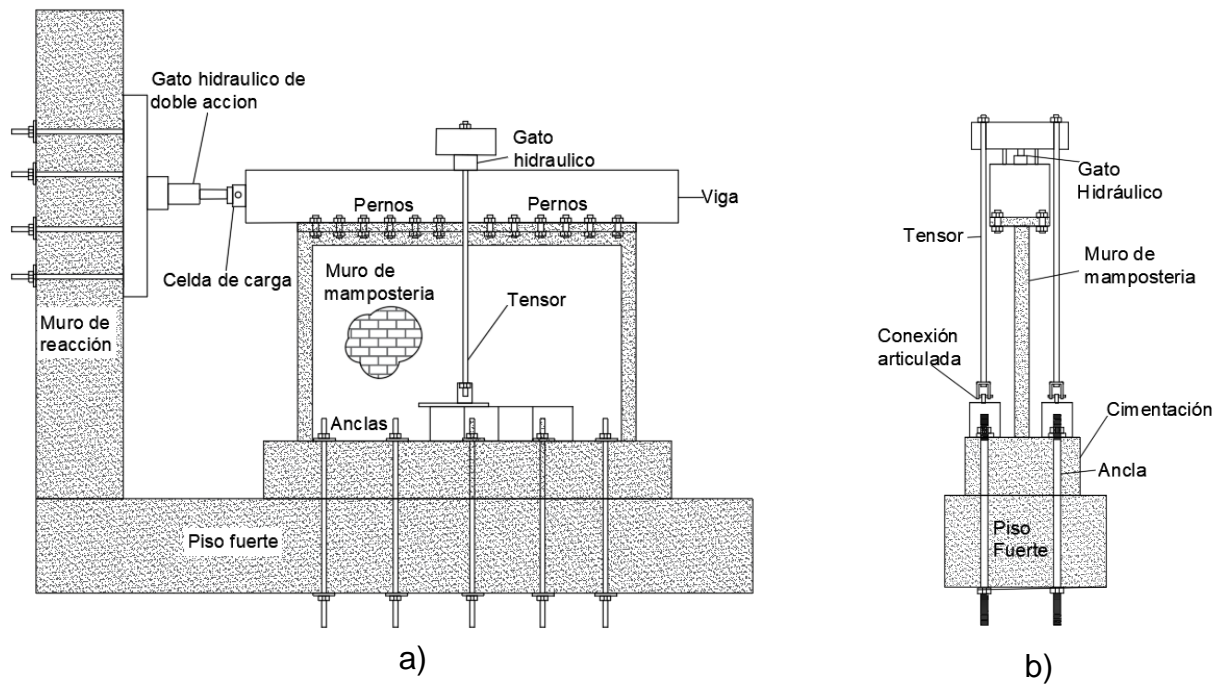
Tabla 5. Análisis de Precio Unitario

Concepto				Unidad	
Colocación de fibra de vidrio en tiras de 10cm de ancho por ambas caras del muro, Incluye: Trazo y corte de tiras, consumibles, herramientas y todo lo necesario para su correcta ejecución.				M2	
Costo de Consumibles					
Nombre	Unidad	Rendimiento	Costo	Importe	
Fibra de vidrio tipo Petatillo	kg	0.730	\$ 68.97	\$ 50.34	
Resina liquida y Catalizador	kg	0.659	\$ 126.72	\$ 83.48	
Cinta Adhesiva Masking 24 mm x 50 m	Pieza	0.551	\$ 30.17	\$ 16.62	
Brocha de cerda natural 4"	Pieza	0.066	\$ 85.00	\$ 5.60	
Guante de recubrimiento de nitrilo	Pieza	0.066	\$ 55.00	\$ 3.62	
Mascara KN95	Pieza	0.689	\$ 3.45	\$ 2.37	
Marcador Sharpie color negro punto fino	Pieza	0.066	\$ 19.50	\$ 1.28	
Total Consumibles				\$ 163.32	
Costo de Herramientas					
Nombre	Unidad	Rendimiento	Costo	Importe	
Lentes de Seguridad transparentes	Pieza	0.002	\$ 55.00	\$ 0.11	
Tijeras 9-1/2	Pieza	0.002	\$ 163.79	\$ 0.33	
Total Herramienta				\$ 0.44	
Costo de Mano de Obra					
Nombre	Unidad	Rendimiento	Costo	Importe	
Ayudante de Albañil	Jornada	0.125	\$ 433.33	\$ 54.17	
Oficial Albañil	Jornada	0.125	\$ 500.00	\$ 62.50	
Total Mano de Obra=				\$ 54.17	
Total a Costo Directo=				\$ 217.93	
F.S.C=				1.25	
P.U=				\$ 272.41	
Descripción	Unidad	Cantidad	P.U	Importe	
Colocación de fibra de vidrio en tiras de 100mm de ancho en ambas caras del muro, Incluye: Trazo y corte de tiras, consumibles, herramientas y todo lo necesario para su correcta ejecución.	m ²	7.59	\$ 272.41	\$ 2,067.56	

3.6. Marco de carga

En la Figura 13a se muestran los detalles de las conexiones y elementos del sistema de aplicación de carga. El marco de carga se colocó de acuerdo a la ubicación de los puntos de anclaje situados en el piso fuerte y el muro de reacción del laboratorio. Debido a que el ensaye de especímenes se llevó a cabo en voladizo fue requerido empotrar la cimentación de concreto al piso fuerte mediante barras de acero de 1 ½ pulgadas de diámetro con espaciado a cada 0.70 m.

La aplicación de carga vertical se aplicó en la parte superior del muro de mampostería a través de un actuador hidráulico y una viga de acero anclada a la cimentación por medio de tensores (Figura 13b). La carga vertical se transfirió al muro a través de una viga rígida con el objetivo de distribuirla uniformemente. Dicha viga se conectó al muro por medio de pernos de 5/8 pulgadas espaciados a cada 250 mm. La carga lateral se aplicó por medio de dos actuadores hidráulicos de doble acción, los cuales se anclaron al muro de reacción del laboratorio y a la misma viga robusta de acero usada para la carga vertical (Figura 13c).



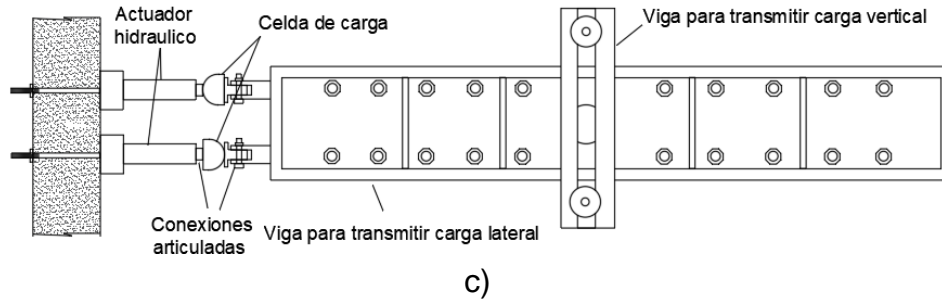


Figura 13. Marco de carga a) Elevación, b) Vista transversal, c) Vista en planta

3.7. Instrumentación de los especímenes

La carga lateral fue medida por medio de celdas de carga conectadas al sistema de datos modelo TDS-630 de la marca Tokio Sokki Kenkyujo Co (Figura 14). La carga vertical se midió a través de un manómetro previamente calibrado con las mismas celdas.



Figura 14. Equipo de registro de datos TDS-630

Las deformaciones de los especímenes se midieron con el uso de medidores de desplazamiento colocados estratégicamente en diferentes puntos del muro (Figura 15). Se colocaron dos dispositivos verticales (V-1 y V-2), dos horizontales (H-1 y H-2), así como dos diagonales (D-1 y D-2). Además, se monitoreó el perfil deformado de uno de los castillos mediante los dispositivos P-1 al P-5, y el dispositivo colocado en la base de la cimentación (P6) se colocó para medir el movimiento de cuerpo rígido del sistema.

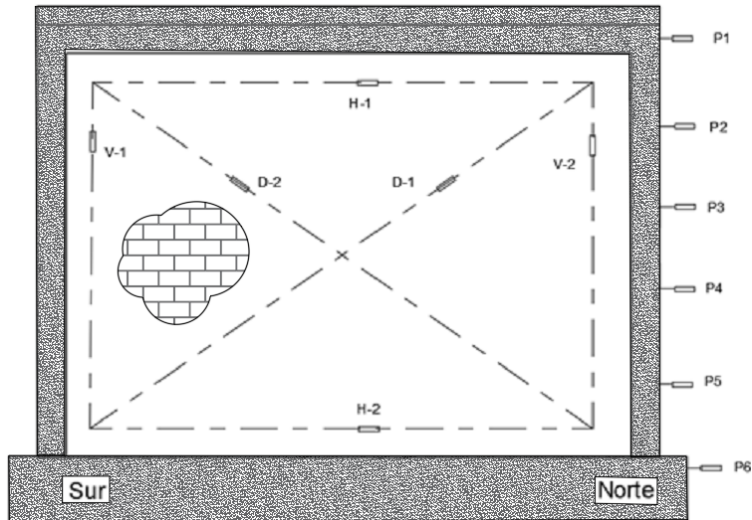
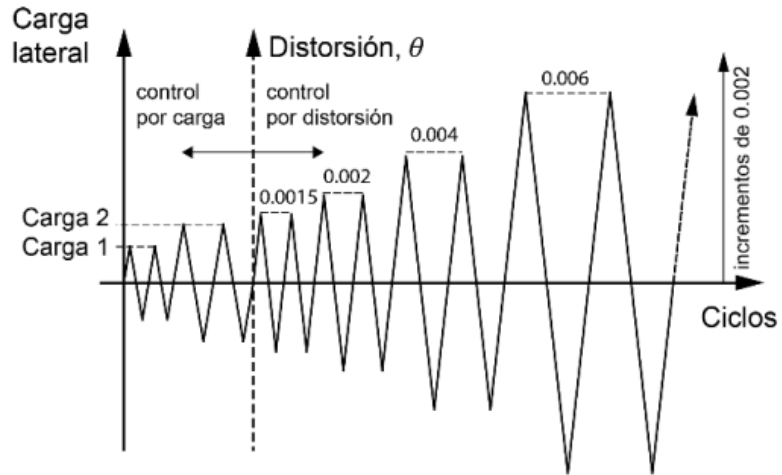


Figura 15. Ubicación de dispositivos de medición de desplazamientos

3.8. Secuencia de carga

Durante la ejecución de los ensayos se aplicó una carga vertical constante de 100 kN sobre la viga de transmisión de carga, con la finalidad de simular las acciones gravitacionales correspondientes a las que está sometido un muro del primer nivel de una vivienda de interés social de dos pisos.

Los ensayos de los muros se realizaron ante carga lateral cíclica reversible. Para la aplicación de la carga lateral se estimó la resistencia de agrietamiento del muro de acuerdo con las especificaciones de las normas mexicanas. Se obtuvo una resistencia al agrietamiento estimada de 140 kN. Al conocer la resistencia de agrietamiento estimada se aplicó el protocolo de carga especificado en el apéndice A de las NTCM (2020): el primer par de ciclos fue controlado por el 25% de la resistencia de agrietamiento estimada y el segundo par por el 50%. A partir del tercer par de ciclos, aplicaron pares de ciclos controlados por distorsiones con incrementos de 0.002 hasta alcanzar la falla del muro o la reducción del 20% de la carga lateral con respecto a la resistencia máxima (Figura 16).



Carga 1 = 0.25 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia
 Carga 2 = 0.5 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia

Figura 16. Protocolo de ensaye (NTCM, 2020)

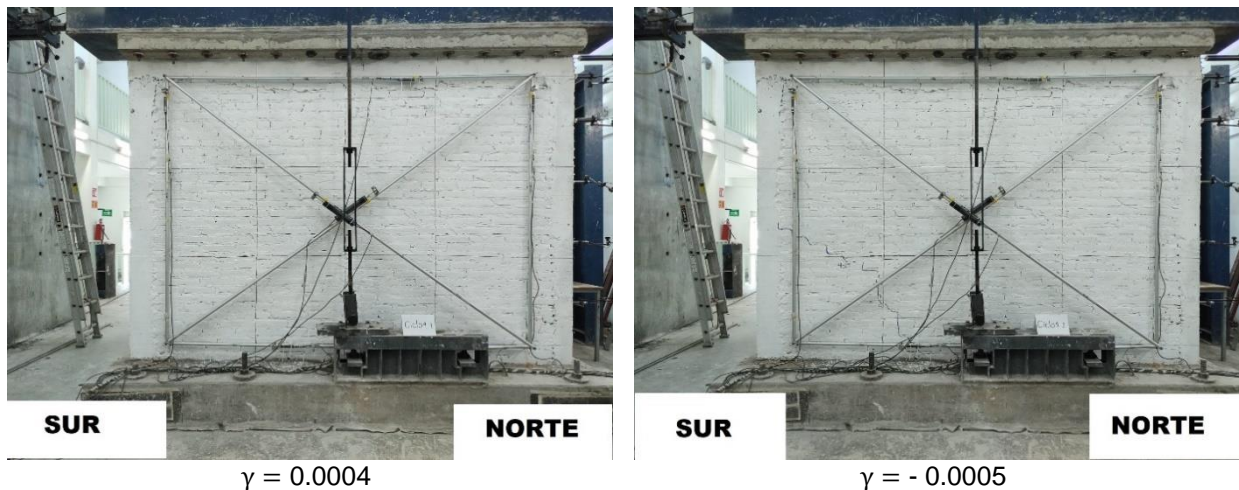
4. RESULTADOS

4.1 Evolución de agrietamiento y curvas histéricas

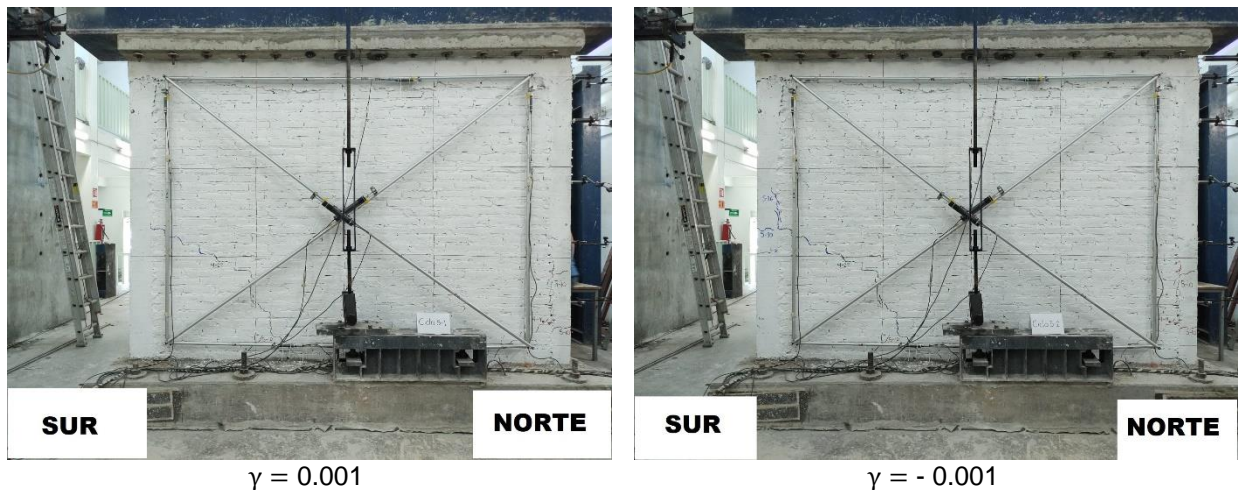
A continuación, se describen a detalle los sucesos más representativos que ocurrieron durante los ensayos de los especímenes, y se asocian a diferentes etapas de sus respectivas curvas histeréticas. La curva histerética de un determinado espécimen se construye a partir de la medición de la carga lateral aplicada y su distorsión lateral. La distorsión es la relación entre el desplazamiento horizontal de un punto en el muro y su altura. Para los especímenes que se presentan en este proyecto se tomó como referencia el punto P1, según se describe en la sección 3.7 de este documento (ver Figura 15).

En las Figuras 17 se muestra la evolución del agrietamiento del muro sin refuerzo (MCT-SR) y en la Figura 18 se presenta la curva histerética de dicho espécimen. En los primeros tres ciclos del ensayo del muro MCT-SR no ocurrió ningún tipo de agrietamiento o daño visible. Fue hasta el ciclo 4 cuando se presentó la primera grieta en el muro. Dicha grieta apareció en la zona de la esquina inferior norte, a una carga lateral de 64.09 kN y a una distorsión de 0.00036. En el mismo ciclo 4, cuando la carga lateral cambió de sentido, ocurrió otra grieta inclinada en la esquina inferior sur del muro, a una carga lateral de -58.94 kN y a una distorsión de -0.00040. De acuerdo con el protocolo de ensaye, estos primeros cuatro ciclos fueron controlados por la carga lateral aplicada. A partir del ciclo 5, la prueba se controló por la distorsión en el muro. Las primeras grietas por flexión aparecieron en la parte inferior del castillo norte, durante el ciclo 5, a una carga lateral $V = 114.61$ kN y a una distorsión $\gamma = 0.001$. En el castillo sur, la aparición de grietas por flexión se dio en el mismo ciclo 5, a una carga $V = -91.94$ kN y distorsión de -0.001. Durante el ciclo 6, nuevas grietas por flexión aparecieron. En el ciclo 7, a una carga $V = 103.19$ kN y a una distorsión $\gamma = 0.001$, apareció una nueva grieta diagonal bien definida, la cual se extendió desde la altura media del extremo norte del muro hacia la parte baja central. Dicha grieta se conectó con las grietas previas por flexión del castillo norte. En el ciclo 8, en el cual se alcanzó una distorsión $\gamma = 0.002$, aparecieron algunas nuevas grietas por flexión en los castillos y agrietamiento diagonal menor. En el ciclo 9, el agrietamiento diagonal principal se extendió hasta la parte inferior de los castillos de acuerdo con el sentido de la carga, con lo que se definió claramente las trayectorias de

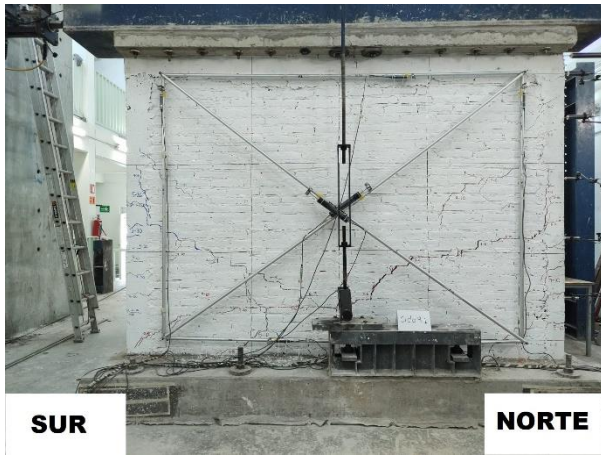
falla del muro. En este mismo ciclo se alcanzó la máxima carga lateral de 147.91 kN, a una distorsión de 0.0040. En el ciclo 10, incrementó el ancho de las grietas formadas en el ciclo previo. En el ciclo 11 ocurrió la falla de los castillos, a juzgar por su cizallamiento a través de las grietas diagonales principales. Se registró que la mayor carga lateral alcanzada en este ciclo fue 94.03 kN (a una distorsión $\gamma = 0.006$), la cual representa el 63.6% de la carga máxima aplicada. Consecuentemente, con base en el protocolo de ensaye de las NTCM (2020), se consideró que el espécimen había fallado para este nivel de deformación y se detuvo el ensaye después de aplicar el correspondiente ciclo de repetición (ciclo 12).



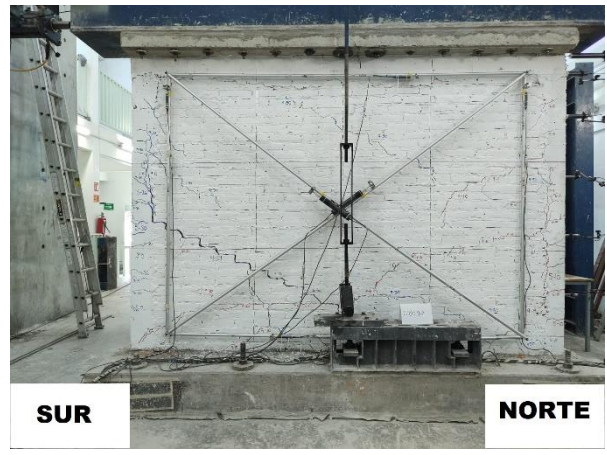
a) Agrietamiento del espécimen MCT-SR en el ciclo 4



b) Agrietamiento del espécimen MCT-SR en el ciclo 5

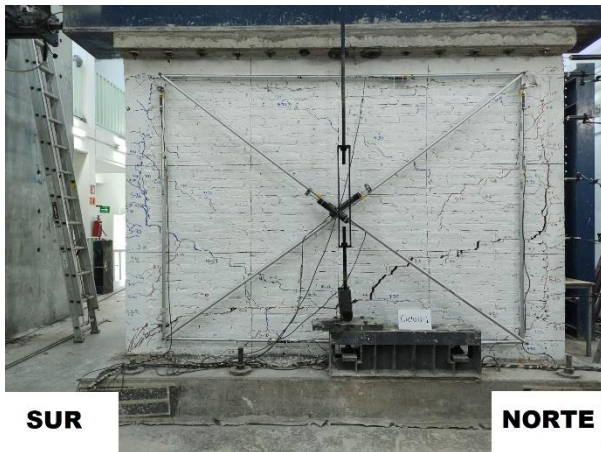


$\gamma = 0.004$

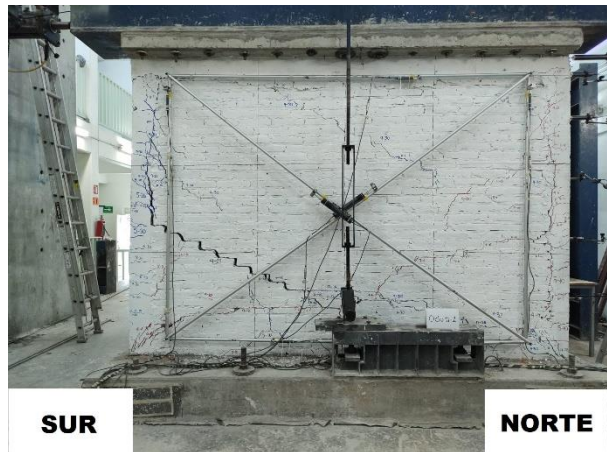


$\gamma = -0.004$

c) Agrietamiento del espécimen MCT-SR en el ciclo 9



$\gamma = 0.006$



$\gamma = -0.006$

d) Agrietamiento del espécimen MCT-SR en el ciclo 11

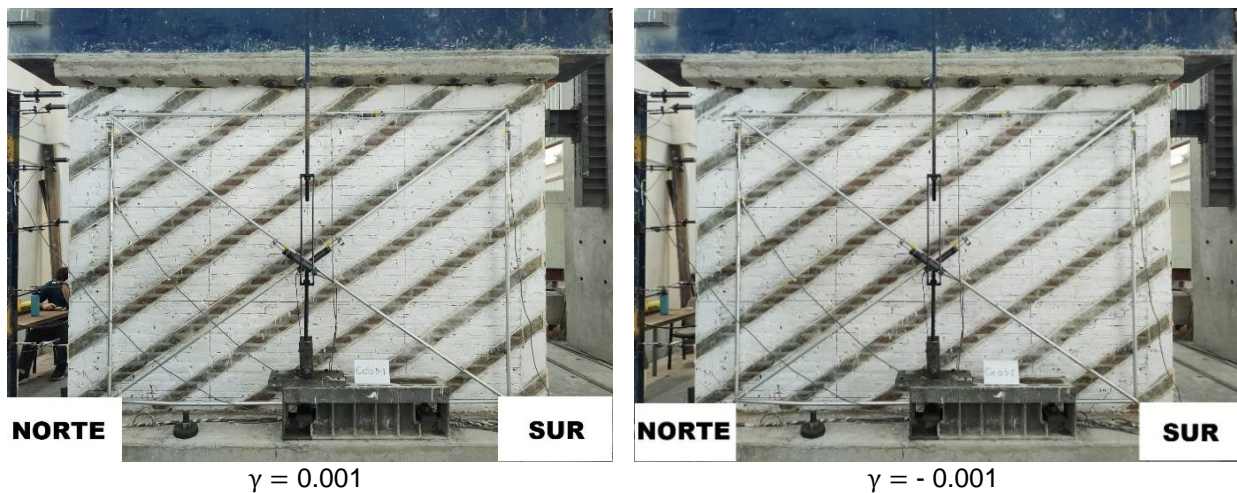
Figura 17. Evolución del agrietamiento del espécimen MCT-SR



Figura 18. Curva histerética del espécimen MCT-SR

Para el espécimen con refuerzo a base de GFRP (MCT-FV30), la evolución del agrietamiento se muestra en la Figura 19 y en la Figura 20 se presenta la curva histerética de dicho muro. En el caso de este espécimen, el primer agrietamiento ocurrió en el ciclo 5, a una carga lateral de 79.59 kN y a una distorsión de 0.00051. Este agrietamiento consistió en un conjunto de tres pequeñas grietas inclinadas ubicadas en la esquina inferior norte del muro. Cuando la carga lateral cambió de sentido, aún en el ciclo 5, apareció otra grieta inclinada bien definida en la equina inferior sur del muro, a una carga $V = -93.99$ kN y a una distorsión $\gamma = -0.00062$. Las primeras grietas por flexión aparecieron también en el ciclo 5 en la parte inferior de los castillos, según el sentido de la carga. Dichas grietas aparecieron junto con las primeras grietas inclinadas, a distorsiones de 0.00051 y -0.00061. El agrietamiento por flexión en el muro MCT-FV30 apareció para una distorsión menor que en el muro MCT-SR. Este resultado se atribuye a que el refuerzo redujo la deformación por cortante en el muro, impidiendo que el agrietamiento inclinado se desarrolle, por lo que la deformación del sistema se logró a través de grietas por flexión. En el ciclo 6 no aparecieron nuevas grietas diagonales ni por flexión. En el ciclo 7, en el cual se alcanzó una carga $V = 149.12$ kN y una distorsión $\gamma = 0.002$, nuevas grietas por flexión aparecieron en la altura central de los castillos y las grietas diagonales se extendieron hacia la zona central del muro. En el ciclo 8 apareció agrietamiento diagonal menor. En el ciclo 9, para una carga lateral $V = 165.16$ kN y una

distorsión $\gamma = 0.004$, apareció una grieta diagonal bien definida, la cual se prolongó desde la parte superior del castillo norte a la parte inferior del castillo sur. En el mismo ciclo, cuando la carga lateral cambió de sentido, agrietamiento diagonal bien definido apareció en la dirección opuesta. En el ciclo 10, el ancho de las grietas formadas en el ciclo previo incrementó. En el ciclo 11 se alcanzó la máxima carga lateral de 169.67 kN, a una distorsión de 0.0058. En este ciclo ocurrió el desprendimiento de una tira de GFRP por cada lado del muro y el agrietamiento diagonal penetró la parte inferior de los castillos, con lo cual se definió claramente la trayectoria de falla del muro. En el ciclo 13 se desprendieron otras tres tiras de GFRP por cada lado del muro, el ancho de las grietas diagonales principales incrementó considerablemente y los castillos fallaron por cizallamiento en la parte inferior. Se registró que la mayor carga lateral alcanzada en este ciclo fue 119.05 kN (a una distorsión $\gamma = 0.008$), la cual representa el 70.2% de la carga máxima aplicada. Por lo tanto, se consideró que el espécimen había fallado para este nivel de deformación y se detuvo el ensaye después de aplicar el siguiente ciclo de repetición (ciclo 14).



a) Agrietamiento del espécimen MCT-FV30 en el ciclo 5

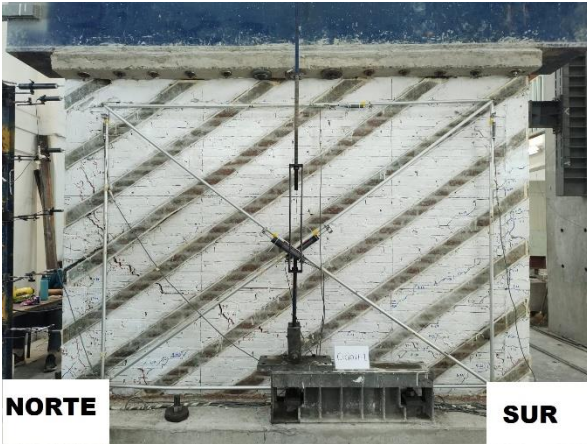


$\gamma = 0.004$



$\gamma = -0.004$

b) Agrietamiento del espécimen MCT-FV30 en el ciclo 9



$\gamma = 0.006$



$\gamma = -0.006$

c) Agrietamiento del espécimen MCT-FV30 en el ciclo 11



$\gamma = 0.008$



$\gamma = -0.008$

d) Agrietamiento del espécimen MCT-FV30 en el ciclo 13

Figura 19. Evolución del agrietamiento del espécimen MCT-SR

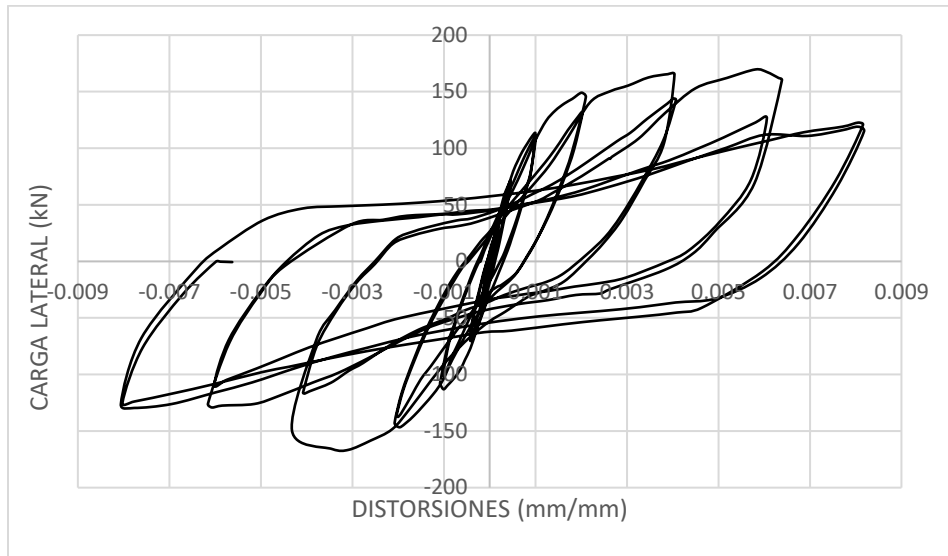


Figura 20. Curva histerética del espécimen MCT-FV30

En la Figura 21 se presenta una comparación entre los patrones finales de agrietamiento de los especímenes. Se observa que las grietas principales siguen una trayectoria de falla muy parecida. Además, no se observa un agrietamiento mayormente distribuido en el muro con refuerzo (MCT-FV30), como ocurrió en ensayos previos de muros de block (Corrales, 2013) y como es generalmente aceptado para el caso de muros con refuerzo horizontal (García, 2023). Estos resultados concuerdan con el hecho de que el aumento de la carga lateral máxima fue poco significativo. Sin embargo, el ancho de las grietas fue menor, con lo que el muro MCT-FV30 conservó su resistencia para una mayor distorsión.

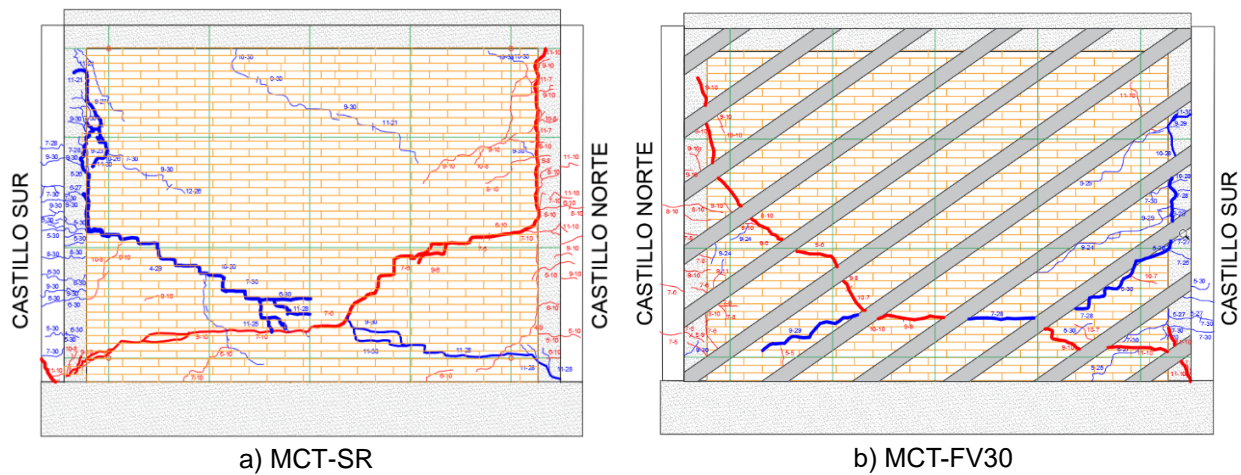


Figura 21. Patrón final de agrietamiento en los especímenes

La comparación de las curvas histeréticas de los especímenes MCT-SR y MCT-FV30 se presenta en la Figura 22. En general, se observa que el espécimen con refuerzo (MCT-FV30) alcanzó una carga lateral mayor que el espécimen sin refuerzo (MCT-SR) en cada ciclo; el muro MCT-FV30 se pudo alcanzar una mayor deformación, la capacidad de disipar energía del muro MCT-FV30 fue mayor en comparación al muro MCT-SR y esta puede ser observada en el incremento de área dentro de la curva. También se observa una mayor repetibilidad de los ciclos, es decir que, en cada incremento de distorsión, el ciclo de repetición se aproximó mejor al ciclo principal. Este resultado es consistente con el hecho de que, en el muro reforzado, el agrietamiento prácticamente no aumentó en los ciclos de repetición; mientras que en el muro sin refuerzo nuevas grietas aparecían en los ciclos de repetición. Además, se observa una mayor estabilidad en la curva del espécimen MCT-FV30, juzgando porque los lazos que compone la curva son mejor definidos. En el espécimen con refuerzo se aplicó un mayor número de ciclos (14 ciclos), lo cual es consistente con la mayor deformación que alcanzó. En el muro sin refuerzo se aplicaron 12 ciclos.

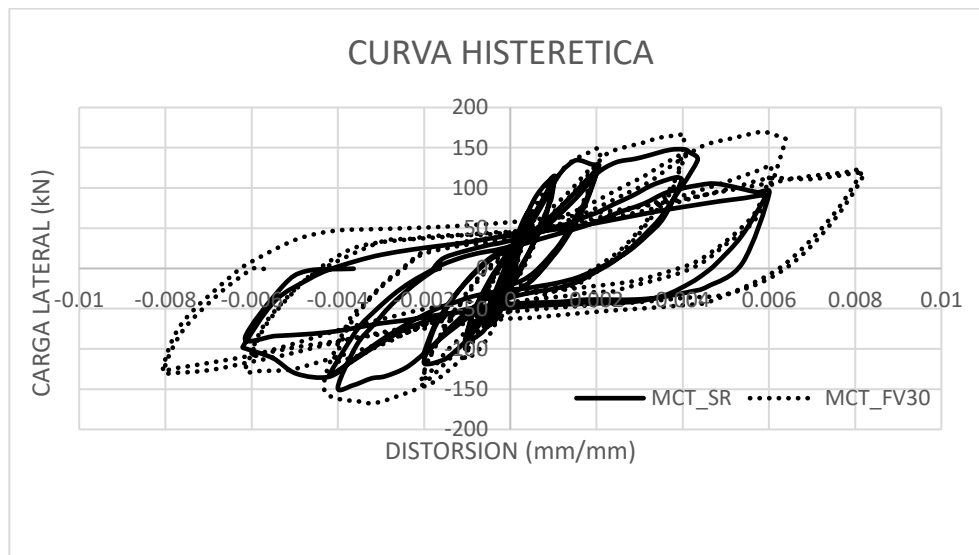


Figura 22. Comparación de las curvas histeréticas

4.2 Curvas envolventes

En las Figuras 23 y 24 se muestran las curvas envolventes de los especímenes sin refuerzo (MCT-SR) y con refuerzo (MCT-FV30), respectivamente. Dichas curvas se formaron uniendo los puntos máximos positivos de los ciclos principales de la curva histerética. Para cada curva envolvente se indican los puntos críticos: Primer agrietamiento (γ_{cr} , V_{cr}), resistencia máxima (γ_{max} , V_{max}), resistencia última (γ_u , V_u).

La presencia de la primera grieta se registró de manera visual, la resistencia máxima se identificó como el punto más alto en la curva histerética y la resistencia última se asocia a la falla del muro. En ambos muros, se consideró que la falla se alcanzó al producirse una caída de la resistencia lateral del muro del 20% respecto a la resistencia máxima, como lo establecen las NTCM (2020). Se debe mencionar, sin embargo, que ninguno de los especímenes sufrió daños que comprometieran su estabilidad para este nivel de deformación.

En las Figuras 23 y 24 se incluye también el modelo elastoplástico equivalente de cada curva envolvente del correspondiente espécimen. Dicho modelo se obtuvo en cumplimiento de los puntos siguientes:

- El área bajo la curva del modelo elastoplástico equivalente debe ser igual al área bajo la curva envolvente hasta el punto de falla.
- La ordenada de intersección de la rama ascendente del modelo elastoplástico equivalente con la envolvente experimental deberá ser $0.6V_y$, donde V_y es la resistencia a la fluencia del modelo elastoplástico.

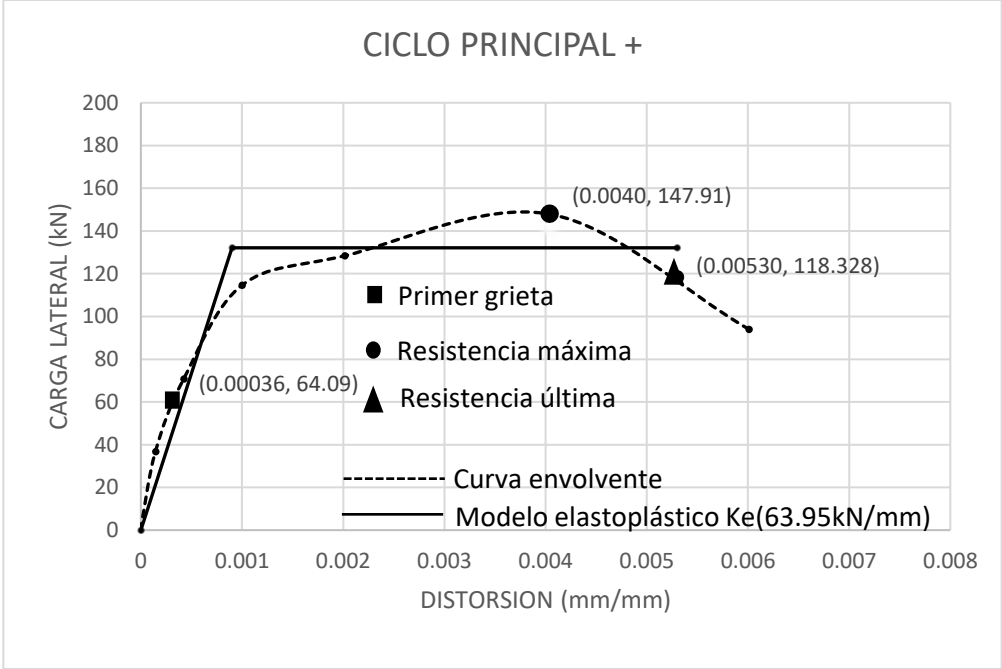


Figura 23. Curva envolvente del muro sin refuerzo (MCT-SR)

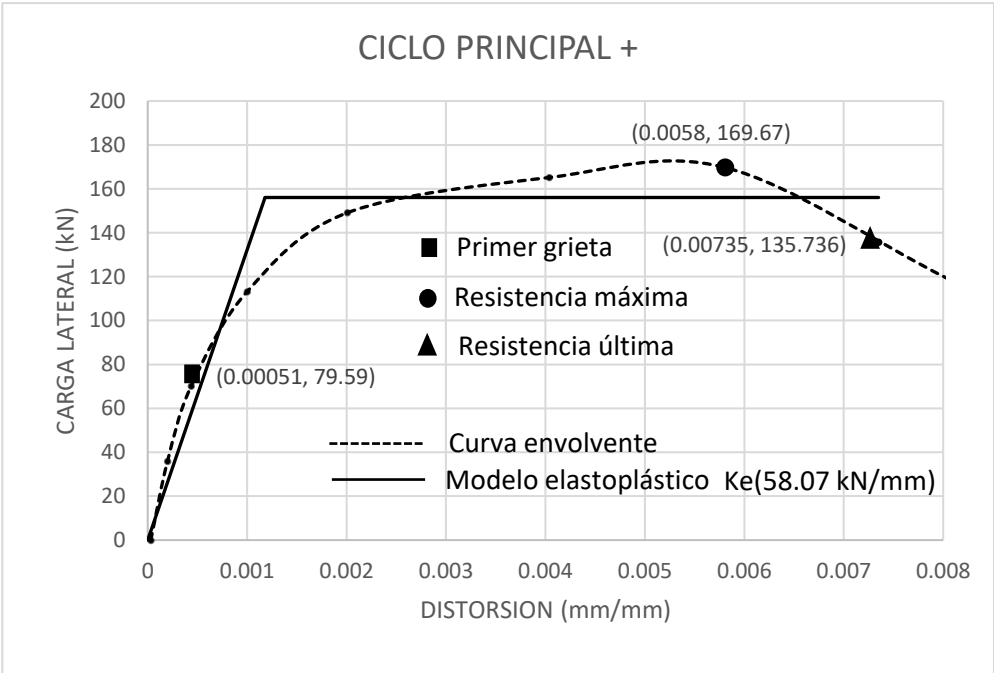


Figura 24. Curva envolvente del muro con refuerzo (MCT-FV30)

4.3. Resistencia lateral

4.3.1. Resistencia de agrietamiento

Mediante inspección visual se identificó el primer agrietamiento en los muros. La resistencia al agrietamiento (V_{cr}) se definió como la carga lateral registrada cuando apareció la primera grieta inclinada durante el ensaye. La resistencia V_{cr} registrada para el espécimen MCT-SR fue de 64.09 kN y para MCT-FV30 fue de 79.56 kN, lo cual representa un aumento de la resistencia al agrietamiento del 24.1% debido a la presencia del refuerzo a base de tiras de GFRP (Tabla 6).

4.3.2. Resistencia a la fluencia

La resistencia a la fluencia del modelo elastoplástico (V_y) se puede identificar como el nivel de carga para el cual hay un cambio en la pendiente de la curva carga lateral – distorsión. Para el espécimen sin refuerzo (MCT-SR), la resistencia de fluencia V_y fue de 132.14 kN, mientras que para el muro reforzado con GFRP (MCT-FV30) fue de 156.05 kN (Tabla 6). El aumento del 18.1 % se atribuye al uso de GFRP como método de refuerzo.

4.3.3. Resistencia máxima

La determinación de la resistencia máxima (V_{max}) de los especímenes se realizó durante el ensaye identificando la carga lateral máxima aplicada. La resistencia máxima para el espécimen MCT-SR fue 147.91 kN, y para el MCT-FV30 fue 169.67 kN (Tabla 6). Estos valores obtenidos en el ensaye de los especímenes indicaron que el uso de GFRP permitió incrementar la resistencia lateral en un 14.7%.

4.3.4. Resistencia ultima

La resistencia última (V_u) de cada muro se determinó con base a las especificaciones de las NTCM (2020). En este sentido, se consideró que la falla de cada espécimen ocurrió cuando la carga lateral aplicada disminuyó un 20% respecto a la resistencia máxima. Para el MCT-SR, su resistencia última fue de 118.32 kN y para el MCT-FV30 fue de 135.73 kN (Tabla 6).

4.3.5. Relación resistencia máxima/resistencia al agrietamiento

La relación entre la resistencia máxima y la resistencia al primer agrietamiento (V_{max}/V_{cr}) constituye un indicador de cuanta carga lateral puede resistir el muro después de ocurrir el agrietamiento. Para el muro sin refuerzo (MCT-SR), el valor de este cociente fue 2.31, mientras que el muro reforzado tuvo una relación V_{max}/V_{cr} de 2.13, 7.8% menor, (Tabla 6).

Tabla 6. Valores de resistencias a los puntos críticos

Espécimen	V_y (kN)	V_{cr} (kN)	V_{max} (kN)	V_u (kN)	V_{max}/V_{cr}
MCT_SR	132.14	64.09	147.91	118.32	2.31
MCT_FV30	156.05	79.56	169.67	135.73	2.13

4.4. Rigidez lateral

4.4.1. Rigidez inicial

Para cada muro, la rigidez inicial (K_i) se obtuvo como la pendiente de la línea recta que une el origen de la curva carga lateral - distorsión y el punto máximo de su primer ciclo (Tabla 7). En el caso del espécimen MCT-SR, su rigidez inicial fue de 107.8 kN/mm, y en el del muro MCT-FV30 el valor de K_i fue de 94.4 kN/mm, lo cual indica que el refuerzo a base de GFRP tuvo un ligero efecto de pérdida en la rigidez inicial del sistema del 12.43%.

4.4.2. Degradación de la rigidez lateral

Para el estudio de la degradación de la rigidez lateral de los muros se utilizó el concepto de rigidez normalizada de ciclo (K_N). La rigidez normalizada se define como el cociente entre la rigidez lateral en un determinado ciclo (K_c) y la rigidez lateral correspondiente al primer ciclo (K_{c1}). La rigidez lateral de ciclo (K_c) es igual a la pendiente de la línea recta que une el punto máximo positivo y negativo de un determinado ciclo.

En la Figura 25 se muestra la curva de rigidez normalizada ($K_N = K_c/K_{c1}$) – distorsión de ciclo (γ_c) para cada uno de los especímenes. La distorsión de ciclo (γ_c) es la mayor

distorsión que se alcanzó en un determinado ciclo. Las curvas $K_N - \gamma_c$ presentan la forma típica registrada en la literatura para muros de mampostería, caracterizada porque en los primeros ciclos se presenta la mayor degradación de rigidez y conforme las distorsiones aumentan la degradación disminuye. En consecuencia, la pendiente de la curva disminuye considerablemente para cierto nivel de deformación. En general, se observa en la Figura 25 que el refuerzo de GFRP ayudó ligeramente a disminuir la degradación de la rigidez, a juzgar por que la curva del muro MCT-FV50 queda ligeramente por encima de la del muro sin refuerzo (MCT-SR), por lo que se requiere una mayor distorsión en el muro reforzado para obtener el mismo grado de degradación en ambos especímenes.

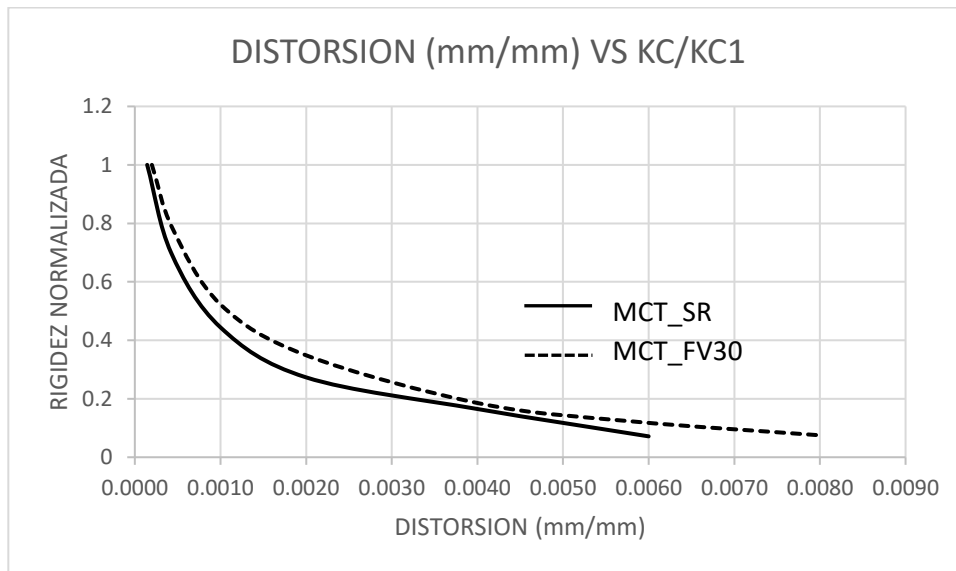


Figura 25. Curva de rigidez normalizada – distorsión

En la Tabla 7 se presentan los valores de la rigidez normalizada (K_N) y del porcentaje de reducción para diferentes niveles de distorsión. En promedio, comparando para diferentes niveles de distorsión, la rigidez normalizada del muro con refuerzo fue 1.28 veces mayor que el muro sin refuerzo, lo cual indica que tuvo una menor degradación de la rigidez lateral. Comparando el valor de K_N para ciclos específicos, se obtuvo que para el ciclo 3 el muro MCT-FV30 degradó 12% menos rigidez lateral, mientras que para el ciclo 11 ($\gamma = 0.006$) degradó 72% menos. Para alcanzar el mismo nivel de degradación del 93%, se requirió una mayor deformación en el muro reforzado. Es decir, para una degradación de la rigidez del 93%, el muro MCT-SR alcanzó una distorsión de 0.006, mientras que en el MCT-FV30 la distorsión fue 0.008.

Tabla 7. Rigidez inicial y degradación de rigidez

Espécimen	K_i (kN/mm)	Ciclo	K_c (kN/mm)	K_c/K_{c1} (kN/mm)	Reducción de rigidez (%)	Distorsión
MCT_SR	107.8	1	97.35	1.00	0%	0.00014
		3	68.08	0.70	30%	0.00042
		5	43.23	0.44	66%	0.00100
		7	26.59	0.27	73%	0.00200
		9	16.05	0.16	84%	0.00400
		11	6.95	0.07	93%	0.00600
MCT_FV30	94.4	1	95.57	1.00	0%	0.00020
		3	74.91	0.78	22%	0.00044
		5	49.94	0.52	48%	0.00100
		7	33.22	0.35	65%	0.00200
		9	17.50	0.18	82%	0.00400
		11	11.70	0.12	88%	0.00600
		13	7.08	0.07	93%	0.00800

4.5. Distorsión y ductilidad

Los valores presentados en la Tabla 8 corresponden a las distorsiones y ductilidades que desarrollaron cada uno de los especímenes a los puntos críticos de la curva envolvente.

La distorsión al primer agrietamiento (γ_{cr}) del muro con refuerzo (MCT-FV30) fue 1.42 veces mayor que la del muro sin refuerzo (MCT-SR); la distorsión a la resistencia máxima fue 1.45 veces mayor; mientras que en la comparación de la capacidad de deformación (γ_u), fue muro MCT-FV30 tuvo un valor 1.40 veces mayor (Tabla 8).

Las ductilidades a la resistencia máxima (μ_{max}) y a la resistencia última (μ_u) se obtuvieron mediante el cociente entre la correspondiente distorsión y la distorsión de fluencia del modelo elastoplástico.

La ductilidad a la resistencia máxima y última de espécimen sin refuerzo (MCT-SR) fueron 4.44 y 5.89, respectivamente; mientras que para el muro con refuerzo a base de GFRP (MCT-FV30) los valores de dichos parámetros fueron 4.92 y 6.27, respectivamente. Es decir, el uso de fibra de vidrio como refuerzo incrementó ligeramente la ductilidad del sistema: a la resistencia máxima, μ_{max} del espécimen MCT_FV30 fue 1.11 veces mayor, y a la resistencia última fue 1.06 veces mayor.

Tabla 8. Distorsiones y ductilidad de especímenes

Especímen	γ_y	γ_{cr}	γ_{max}	γ_u	$\mu_{max} = \gamma_{max}/\gamma_y$	$\mu_u = \gamma_u/\gamma_y$
MCT_SR	0.00090	0.00036	0.0040	0.0053	4.44	5.89
MCT_FV30	0.00118	0.00051	0.0058	0.0074	4.92	6.27

4.6. Capacidad de disipar energía

La energía disipada (E_d) se calculó como el área delimitada por la curva carga lateral – distorsión. La determinación de la energía disipada acumulada (E_{da}) se realizó sumando la energía disipada en cada ciclo de carga.

En la Figura 27 se presenta la evolución de la energía disipada acumulada conforme a las distorsiones desarrolladas por los especímenes durante sus ensayos. Se observa que para una distorsión $\gamma = 0.002$ (ciclo 7) los muros disiparon prácticamente la misma cantidad de energía. Fue hasta distorsiones $\gamma = 0.004$ (ciclo 9) y $\gamma = 0.004$ (ciclo 11) que se observa en la curva $E_{da} - \gamma$ una ligera diferencia en la disipación de energía de los especímenes. Sin embargo, como el muro MCT-FV30 alcanzó una mayor distorsión disipó una cantidad de energía significativamente mayor.

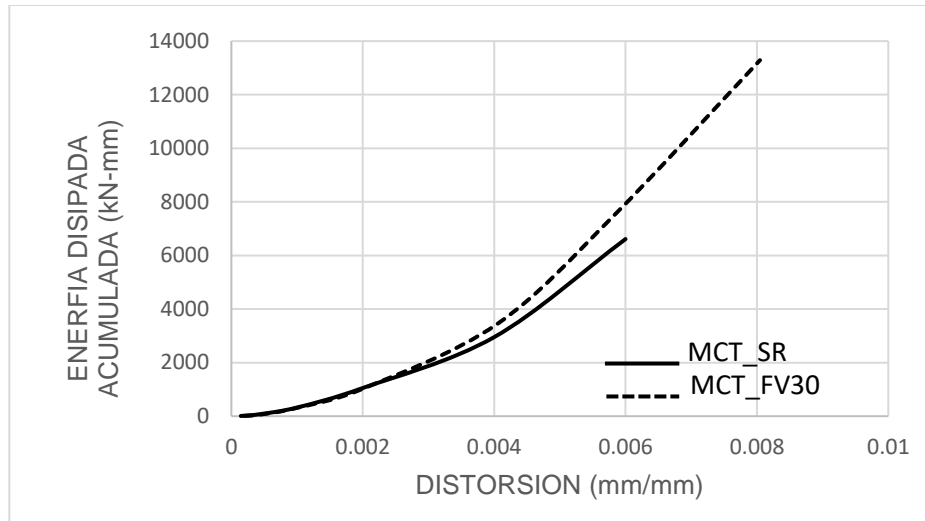


Figura 26. Curvas de energía disipada acumulada – distorsión

En la Tabla 9 se muestran los valores de energía disipada acumulada para los ciclos impares, los cuales corresponden a incrementos en la deformación de los especímenes. Como se identificó en la Figura 27, las E_{da} por los muros a una distorsión de 0.002 fueron prácticamente iguales (la E_{da} por el muro MCT-FV30 fue 0.98 veces la del MCT-SR). Para una distorsión de 0.006, el muro con refuerzo disipó 1.13 veces más energía que el muro sin refuerzo. Al comparar la energía total disipada por los especímenes, se obtiene que el muro con refuerzo disipó 2.01 veces más energía.

Tabla 9. Energía disipada acumulada

Ciclo	MCT-SR		MCT-FV30	
	Distorsión (mm/mm)	E_{da} (kN-mm)	Distorsión (mm/mm)	E_{da} (kN-mm)
1	0.00014	8.57	0.0002	9.99
3	0.00042	71.23	0.00044	59.25
5	0.0010	323.76	0.0010	311.74
7	0.0020	1052.27	0.0020	1031.88
9	0.0040	2949.59	0.0040	3428.26
11	0.0060	6612.2	0.0058	7454.74
13	-	-	0.0080	13288.09

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizaron pruebas experimentales a dos muros de mampostería confinada de tabique rojo recocido de características similares y con relación de aspecto H/L igual a 0.72. La diferencia fue que uno de ellos contó con refuerzo a base de GFRP cubriendo un 30% de la superficie aparente del muro. El refuerzo se colocó por ambas caras del muro, en forma de tiras diagonales y en direcciones opuestas para tomar en cuenta la alternancia de la carga lateral. Los especímenes se ensayaron en voladizo ante carga vertical constante y carga lateral cíclica reversible, de acuerdo con el protocolo de ensaye establecido por las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Gobierno de la Ciudad de México (NTCM, 2020). Los muros fueron debidamente instrumentados para medir las cargas aplicadas y sus deformaciones. Con base a los resultados obtenidos se establecen las siguientes conclusiones:

- La utilización de GFRP como refuerzo en muros de mampostería confinada de tabique rojo recocido aumentó ligeramente a la resistencia lateral del sistema. El muro con refuerzo resistió una carga lateral 14.7% mayor que el muro sin refuerzo.
- El refuerzo de GFRP no tuvo un efecto en la rigidez lateral inicial de los muros. Sin embargo, el muro con refuerzo tuvo una degradación de la rigidez más lenta que el muro sin refuerzo. Para alcanzar la misma degradación del 93%, se requirió deformar al muro no reforzado a una distorsión $\gamma = 0.006$, mientras que al muro con refuerzo a $\gamma = 0.008$.
- La presencia del refuerzo a base de fibra de vidrio en los muros confinados de tabique rojo recocido incrementó ligeramente su ductilidad. Los incrementos de la ductilidad a la resistencia máxima y última fueron de 11% y 6%, respectivamente.
- El uso de GFRP permite incrementar la capacidad de disipar energía. La energía disipada por el espécimen con refuerzo fue del 2.01 veces mayor que la disipada por el espécimen sin refuerzo.
- El muro con refuerzo alcanzó una capacidad de deformación 39.6% mayor al muro sin refuerzo.

Debido a la poca información que se encuentra en la literatura, la evidencia experimental presentada en esta tesis sobre el uso de GFRP como refuerzo en muros de mampostería es muy relevante. Sin embargo, los resultados obtenidos son, todavía, muy limitados para poder generar recomendaciones que permitan diseñar a los muros con suficiente respaldo técnico, puesto que solo se incluyó una cuantía de refuerzo y una relación de aspecto del muro (H/L). Se recomienda, por lo tanto, realizar investigaciones experimentales y numéricas en las que se estudien estas variables.

6. REFERENCIAS

- ABDULAHAD, E. y MAHMUD, E., 2020. Seismic behaviour before and after strengthening of solid confined masonry walls with glass fiber reinforced polymers-analysis of hysteresis curves, obtained by shaking table tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. S.I.: IOP Publishing Ltd, vol. 951. DOI 10.1088/1757-899X/951/1/012018.
- ALEJANDRO BESEDNJAK DIETRICH, 2005. *Materiales Compuestos Procesos de fabricacion de embarcaciones*. 1. Barcelona: Quality Impres, S.L.
- EL-DIASITY, M., OKAIL, H., KAMAL, O. y SAID, M., 2015. Structural performance of confined masonry walls retrofitted using ferrocement and GFRP under in-plane cyclic loading. *Engineering Structures*, vol. 94, ISSN 1873-7323. DOI 10.1016/j.engstruct.2015.03.035.
- ELGAWADY, M., L.P. y B.M., 2005. In-Plane Seismic Response of URM Walls Upgraded with FRP. *ASCE*, vol. 9,
- ESHANI, M.R., S.H. y A.-S.A., 1997. "Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlay". *ASCE*, vol. 1,
- FERDINAND P. BEER, E.R.J.J.J.T.D.D.F.M., 2010. *MECANICA DE MATERIALES*. 5. Mexico, D.F.: McGRAW-HILL.
- J. VELÁZQUEZ-DIMAS, B.Q.-E.J.C.-G.A.R.-S.& J.G.-C., 2012. In-Plane Behavior of Confined Mansory Walls with Holes Retrofitted with GFRP and Subjected to Lateral Cyclic Loading. *15 WCEE*,
- JACK C. MCCORMAC, R.H.B., 2011. *DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO*. 8. Mexico D.F: Alfaomega. vol. 1.
- JUAN I V DIMAS, M.R.E.A.H.S., 2000. Seismic Retrofit of URM Walls With Fiber Composites. *12WCEE*,

- LUIS M. BOZZO, A.H.B., 2004. *Diseño sismorresistente de edificios Técnicas convencionales y avanzadas*. Barcelona: EDITORIAL REVERTE S.A.
- MEIER, U., D.M., M.H., & S.G., 1992. *Strengthening of structures with CFRP laminates: research and applications in Switzerland*. Sherbrooke: EMPA.
- MELI R., 1973. BEHAVIOUR OF MANSORY WALLS UNDER LATERAL LOADS. *Institute of Engineering, National University of Mexico*,
- MICHAEL N. FARDIS, 2009. *Seismic design, assesment and retrofitting of concrete buildings*. Patras: Springer.
- NMX-C-021-ONNCCE, 2015. *Industria de la Construcción - Cemento para Albañilería (Mortero) - Especificaciones y Métodos de Ensayo*. 2015. S.I.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-061-ONNCCE-2015, 2015. *Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos*. 2015. S.I.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-083-ONNCCE, 2014. *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo*. 2014. S.I.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-156-ONNCCE, 2010. *Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. 2010. S.I.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-159-ONNCCE, 2016. *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes de Ensayo*. *Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación*,

- NMX-C-161-ONNCCE, 2013. *Industria de la Construcción - Concreto Fresco - Muestreo*. 2013. S.I.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-464-ONNCCE, 2010. *Industria de la Construcción - Mampostería - Determinación de la Resistencia a Compresión Diagonal y Módulo de Cortante de Muretes, así como Determinación de la Resistencia a Compresión y Módulo de Elasticidad de Pilas de Mampostería de Arcilla o de Concreto - Métodos de Ensayo*. 2010. S.I.: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NTCM, 2020. Normas Tecnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructura de Mampostería. . Mexico, D.F:
- OSCAR RODRIGUEZ-MORA, 2003. *MORTERO, GUIA GENERAL*. Madrid: asociacion nacional de fabricantes de mortero.
- SAYED-AHMED EY, S.N., 1998. *A new steel anchorage system for post-tensioning applications using carbon fibre reinforced plastic tendons*. S.I.: Can J Civ.
- SEDESOL, 2010. *Guía para la Redensificación Habitacional en la Ciudad Interior*. 2010. Mexico D.F.: s.n.
- SERVEI ESTACIÓ, 2024. Propiedades de la fibra de vidrio. <https://serveiestacio.com/blog/propiedades-de-la-fibra-de-vidrio/>.
- TRIANTAFILLOU, T., 1998. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. *ASCE*, vol. 2,
- WENG D, L.X.Z.C.K.T.L.K., 2004. Experimental Study on Seismic Retrofitting of Masonry Walls Using GFRP. *13th world conference on earthquake engineering*,
- ZEEVAERT, L., 2001. *Compendio de sismo-geodinámica : selección de artículos del Dr. Leonardo Zeevaert Wiechers sobre ingeniería sísmica*. S.I.: Fundación ICA. ISBN 9687508655.

7. GLOSARIO

Tabique: Pieza de mampostería de forma prismática rectangular, de dimensiones menores que el bloque, se encuentra fabricado de arcilla comprimida, o bien, extruida por medio del proceso de cocción. Puede ser macizo, hueco o multiperforado. Al tabique macizo de arcilla se le conoce como ladrillo.

Mortero: Los morteros se definen como una mezcla de uno o más conglomerados los cuales pueden ser inorgánicos, áridos, agua y/o aditivos (Rodríguez-Mora, 2003).

Mortero estructural: El mortero empleado en elementos estructurales de mampostería deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- a) Resistencia a compresión mayor o igual a 7.5 MPa (75 kg/cm²).
- b) Contener la cantidad unitaria de cemento hidráulico Portland.
- c) El volumen de arena no deberá ser mayor a 3 veces de la suma de los cementantes en estado suelto.
- d) Sólo emplear la mínima cantidad de agua que proporcione un mortero fácilmente manejable.

Mampostería: Es un material compuesto o integrado por piezas ya sean de origen pétreo, naturales o bien artificiales. Por lo general, las piezas son de tamaño pequeño como para ser manejadas por una persona, y son unidas entre sí por medio de un mortero aglutinante.

Concreto reforzado: El concreto reforzado es una combinación de concreto y acero, en donde el acero proporciona la resistencia a tensión de la cual carece el concreto; el concreto es capaz de resistir fuerzas a compresión y se usa en miembros estructurales (McCormac, 2011).

Castillos y dalas: Elementos estructurales colados en los bordes de muros de forma vertical (castillos) y horizontal (dalas). Algunas características que deben cumplir son:

- a) Debe existir castillos en los extremos de los muros e intersecciones con otros muros y en puntos intermedios donde la separación del muro no sea mayor a 1.5 veces su altura (H), ni 4 m.
- b) Deberá existir una dala en todo el extremo horizontal del muro a menos que éste se encuentre ligado a un elemento de concreto reforzado con peralte igual o superior a 100 mm.
- c) Los castillos y dalas deberán contar con una dimensión mínima del espesor del muro y la dimensión paralela al muro deberá ser no menor a 150 mm.
- d) La resistencia a compresión del concreto utilizado en castillos y dalas deberá ser igual o mayor que 15 MPa (150 kg/cm²).
- e) El refuerzo longitudinal deberá ser de dimensiones óptimas que puedan resistir las componentes verticales y horizontales debido a las cargas laterales y verticales.
- f) Los castillos y dalas estarán reforzados transversalmente por estribos cerrados.

Mampostería confinada: Es la que se encuentra reforzada con castillos y dalas. Para que una mampostería pueda ser considerada como confinada deberá cumplir con el apartado 5.1.1 a 5.1.4 de las Normas Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería del Gobierno de la Ciudad de México (NTCM, 2020). Los castillos deben ser colados una vez que el muro sea construido, se denominará como castillos externos a aquellos que sean construidos por fuera e internos a aquellos construidos dentro de piezas huecas.

Fibra de vidrio: Conjunto de filamentos largos y continuos a base de vidrio. Este material tiene una alta resistencia a tensión en su dirección longitudinal y presenta un comportamiento elástico lineal hasta su punto de falla.

Resina polimérica: Es una resina de tipo insaturada cuyo compuesto es termoestable, capaz de endurecer a partir de un estado líquido, si es sometido a una condición apropiada.

GFRP: Material compuesto por la combinación de fibra de vidrio y resina polimérica. Por sus siglas en inglés, Glass Fiber Reinforced Polymer se denomina GFRP.

Carga lateral en el plano: Es aquella carga que actúa de forma horizontal sobre el eje de simetría del elemento estructural.

Resistencia a compresión: Es la capacidad de un material de soportar fuerzas de compresión por unidad de área hasta alcanzar su punto de ruptura (Beer et al, 2010).

Resistencia a cortante: Es la capacidad de un material de soportar fuerzas actuantes paralelas a la sección transversal hasta alcanzar su punto de corte.

Resistencia lateral: Es la capacidad de resistir esfuerzos provocados por acciones actuantes en sentido horizontal.

Rigidez lateral: Es la propiedad del elemento estructural que mide cuanto se deforma o se desplaza lateralmente para un determinado nivel de carga.

Ductilidad: Es la capacidad de un material o de un elemento estructural de deformarse de forma plástica sin romperse (Bozzo, 2004).

Capacidad de disipar energía: Es la capacidad del elemento de soportar esfuerzos y deformaciones.