



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias Línea Terminal en Estructuras

MAMPOSTERÍA DE TABIQUE REFORZADA CON MATERIALES COMPUESTOS
DE MATRIZ ORGANICA E INORGANICA

T E S I S

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Eduardo Alejandro Aguilar Cardiel

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

SINODALES

Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente

M. en I. Rubén Ramírez Jiménez
Secretario

Dr. Alejandro Manzano Ramírez
Vocal

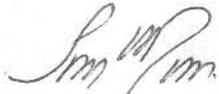
M. en I. Gerardo Rene Serrano Gutiérrez
Suplente

Dr. Miguel A. Pérez Lara y Hdz.
Suplente

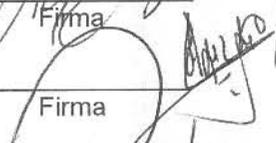
Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Agosto, 2009
México.

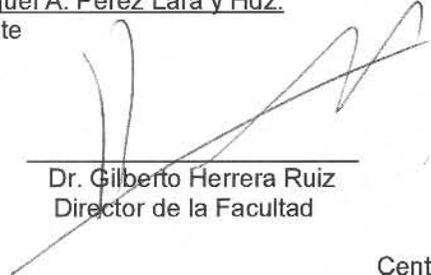

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma





RESUMEN

En este trabajo de tesis, se presentan dos propuestas de reforzamiento con materiales compuestos para mampostería de tabique sin refuerzo. En cada propuesta se utilizó un material compuesto con diferente matriz polimérica. Con matriz polimérica orgánica y fibra continua, se fabricaron varillas de polímero fibro-reforzado (FRP). Mientras que con la matriz polimérica inorgánica se fabricaron tiras de mortero geopolimérico reforzado con malla de alambre de tejido hexagonal. En ambas propuestas, el material compuesto fue aglutinado con adhesivo epóxico sobre la superficie de la mampostería. El programa experimental consistió en ensayar muretes (muros pequeños) reforzados y no reforzados de tabicón sólido de cemento, bajo cargas de compresión continua y cíclica (carga-descarga) sobre su diagonal. Esto para inducir una falla por cortante (agrietamiento) sobre la diagonal de los muretes. El comportamiento estructural de los muretes se valoró por medio del cálculo del esfuerzo y deformación cortante, y del módulo de rigidez. Los resultados muestran que la resistencia y el módulo de rigidez de los muretes reforzados con los diferentes materiales compuestos son mayores a los valores obtenidos con los muretes sin refuerzo. Se obtuvo además, mayor estabilidad al momento de la falla (no hay pérdida de material). Por lo tanto, los materiales y la alternativa de reforzamiento propuesto funcionaron adecuadamente, presuponiéndose que pueden ser una alternativa viable de reforzamiento y rehabilitación para muros de mampostería de tabique no reforzada.

(Palabras clave: Mampostería, materiales compuestos, varillas de polímero fibro-reforzado, geopolímero, esfuerzo cortante.)

SUMMARY

In this thesis work, two reinforcement proposals are presented with composite materials for unreinforced brick masonry. In each proposal a composite material with different polymeric matrix was used. Bars of fiber reinforced polymer (FRP) were manufactured with organic polymeric matrix and continuous fiber. On the other hand, thin ribbons of geopolymeric mortar reinforced with hexagonal steel mesh wire mesh were manufactured with the inorganic polymeric matrix. In both proposals, the composite material was glued with epoxy adhesive on the surface of the masonry. The experimental program consisted on testing reinforced and unreinforced concrete brick masonry specimens of small size, under compression loads on its diagonal (continuous and cyclic), in order to cause the diagonal tension failure (shear) of the specimens. The structural behavior of the specimens was evaluated by calculating of the shear stress and shear strain, and modulus of rigidity. The results showed that the strength and the module of rigidity of the reinforced specimens with the different composite materials were greater than the values obtained with the specimens without reinforcement. A greater stability to the moment of the failure (there is not material loss) was also obtained. Therefore, the materials and the reinforcement proposal worked appropriately and so they can be a viable alternative of reinforcement and rehabilitation for unreinforced masonry wall.

(Key words: Masonry, composite materials, FRP bars, geopolymer, shear stress)

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro el apoyo por brindarme la oportunidad de estudiar en un posgrado de calidad, y así seguir superándome profesionalmente.

En fin, estas palabras no alcanzarían para agradecer a todas las personas que participaron directa e indirectamente en el desarrollo de este trabajo.

INDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Agradecimientos	iii
Índice	iv
Índice de tablas	vii
Índice de figuras	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO DE REFERENCIA	5
2.1 Materiales compuestos	5
2.2 Tipos de matrices poliméricas	6
2.3 Métodos de fabricación para materiales compuestos	7
2.4 Proceso de pultrusión	8
2.5 Tipos de fibra de refuerzo utilizadas en materiales compuestos	9
2.6 Matriz polimérica inorgánica y cementantes geopoliméricos	10
2.7 Ferrocemento	11
2.8 Elementos estructurales reforzados con materiales compuestos	13
2.8.1 Concreto reforzado	13
2.8.2 Mampostería	15
2.8.3 Reparación y rehabilitación de mampostería	21

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	23
3.1 Materiales	23
3.1.1 Varillas de polímero fibro-reforzado (FRP)	23
3.1.2 Mortero geopolimérico	25
3.1.3 Tabiques y morteros con cemento Pórtland	26
3.2 Métodos	29
3.2.1 Propiedades mecánica de las varillas FRP	29
3.2.2 Ensayo a compresión simple del mortero geopolimérico	33
3.2.3 Ensayo de flexión de tiras de mortero geopolimérico reforzado	34
3.2.4 Pruebas de durabilidad sobre las tiras de mortero geopolimérico	35
3.2.5 Ensayo de compresión diagonal en muretes reforzados con varillas FRP	36
3.2.6 Ensayo de compresión diagonal en muretes reforzados con tiras de mortero geopolimérico	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	43
4.1 Propiedades mecánicas del mortero y tiras de mortero geopolimérico	43
4.2 Mampostería reforzada con varillas FRP.	47
4.2.1 Efecto del refuerzo sobre la resistencia a cortante de los muretes.	51
4.2.2 Efecto del refuerzo sobre el alargamiento horizontal y acortamiento vertical.	51
4.2.3 Efecto del refuerzo sobre la rigidez de los muretes.	54
4.3 Mampostería reforzada y rehabilitada con tiras de mortero geopolimerico reforzado con malla.	55
4.3.1 Resistencia a cortante de muretes reforzados con ferro-cemento geopolimérico.	61
4.3.2 Efecto del refuerzo sobre el alargamiento horizontal y acortamiento vertical.	61
4.3.3 Efecto del refuerzo sobre la rigidez de los muretes.	62

4	CONCLUSIONES	63
5	REFERENCIAS	65
6	APENDICE	71

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla		Página
2.1	Tipo de matrices para materiales compuestos	7
3.1	Propiedades Mecánicas: Fibras y Matriz Polimérica	24
3.2	Composición química del metacaolín (% en peso)	26
3.3	Propiedades físicas y mecánicas del tabicón de concreto	27
3.4	Propiedades físicas de la arena utilizada en morteros	28
3.5	Datos de la granulometría de la arena utilizada en morteros.	28
3.6	Propiedades mecánicas a tensión de las varillas FRP	30
3.7	Comparación de propiedades mecánicas a tensión de las varillas FRP y acero	31
3.8	Propiedades mecánicas a flexión de las varillas FRP.	32
3.9	Dimensiones geométricas de los muretes reforzados con varillas FRP	37
3.10	Dimensiones geométricas de los muretes reforzados con geopolímero	41
4.1	Resistencia a compresión de mortero geopolimérico.	44
4.2	Resistencia a la flexión laminados con mortero geopolimérico.	45
4.3	Resumen de resultados de pruebas en muretes reforzados con varillas FRP.	47
4.4	Resumen de resultados de muretes reforzados con geopolímero.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	a) Mampostería confinada, b) Muros reforzados interiormente (NTCM-2004).	16
2.2	a) Falla por cortante, b) por deslizamiento de juntas horizontales, c), d) por aplastamiento en la base	18
3.1	Máquina Prototipo de “Pultrusión”	25
3.2	a) Varilla lisa obtenida, b) Varilla recubierta con epóxico-ceniza volante, c) Varilla recubierta con epóxico-arena sílica.	25
3.3	a) Ensayo de modulo de ruptura en tabiques, b) Ensayo de compresión simple	27
3.4	Ensayo de compresión simple de mortero con cemento Pórtland	29
3.5	Curva esfuerzo-deformación, ensayo a tensión de las varillas FRP	30
3.6	Ensayo de tensión de varillas FRP	31
3.7	Curva carga-deflexión, ensayo a flexión de las varillas FRP	33
3.8	Ensayo de flexión en varillas FRP	33
3.9	Ensayo de compresión simple en cubos de mortero geopolimérico	34
3.10	a) Tiras de mortero geopolimérico reforzado, b) Ensayo de flexión de tiras de mortero geopolimérico	35
3.11	Murete reforzado con varilla de FRP	37
3.12	Arreglo experimental sobre la cara frontal del murete	38
3.13	Murete reforzado con tiras de mortero geopolimérico reforzado a) Murete reforzado RG1CC o RG2CC, b) Murete reforzado RG1CE	42

Figura		Página
4.1	Tiras de mortero geopolimérico.	43
4.2	Ensayo a compresión y flexión de morteros geopoliméricos	44
4.3	Curva carga-deflexión laminados reforzados sin ataque	45
4.4	Curva carga-deflexión laminados sin refuerzo sin ataque	46
4.5	Curva carga-deflexión laminados reforzados: ataque con sulfato de magnesio.	46
4.6	Gráfica esfuerzo-deformación murete no-reforzado (NR): a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga	48
4.7	Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado (R-VFB) con varilla VFB: a) Carga continua, b) Ciclos Carga- descarga	49
4.8	Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado (R-VFE) con varilla VFE: a) Carga continua, b) Ciclos Carga- descarga	50
4.9	Gráfica esfuerzo-deformación murete rehabilitado (RH) con varilla VFE	50
4.10	Imágenes para medición en murete ensayado: no-reforzado (NR)	53
4.11	Imágenes para medición en murete ensayado: reforzado (R), cara no-reforzada	54
4.12	Imágenes para medición en murete ensayado: rehabilitado (RH); cara no-reforzada	54
4.13	Murete ensayado reforzado con geopolimérico (RG1CE)	57
4.14	Gráfica esfuerzo-deformación murete no-reforzado (referencia para geopolímero) : a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga	58
4.15	Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado con geopolímero (RG1CC): a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga	59
4.16	Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado con geopolímero (RG2CC): a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga	60
4.17	Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado con geopolímero (RG1CE): a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga	61

INTRODUCCION

1.1 Descripción del problema

La mampostería de tabique es un material compuesto constituido por tabiques de arcilla o bloques de cemento y juntas de mortero, esta puede ser reforzada y no reforzada, siendo esta última la que presenta más debilidad estructural. Sus propiedades mecánicas son más variables y difíciles de predecir que las del concreto reforzado o el acero, esto debido al escaso control de calidad en los tabiques y procesos constructivos empleados. Los factores que inducen fallas en la mampostería son: debilidad estructural, sobrecargas, vibración dinámica (sísmica o ambiental), hundimientos diferenciales, y deformaciones dentro y fuera del plano.

Las técnicas convencionales para reforzar mampostería sin refuerzo han mostrado ser efectivas (placas de ferro-cemento, mortero lanzado, inyección de mortero, pos-tensado, mallas de acero electro-soldado, grapas de acero, etc.) (ElGawady et al. 2004). Sin embargo, tienen las siguientes desventajas: tiempos largos de aplicación, reducción de espacios, afectación de la estética de la mampostería, incremento de fuerzas inerciales inducidas sísmicamente, etc.

Debido a los inconvenientes mencionados anteriormente, hoy en día, surgen como una alternativa viable las propuestas de reforzamiento con materiales compuestos. La técnica con láminas de polímero fibro-reforzado (FRP) adheridas a la superficie, también han mostrado buenos resultados (Holbert y Hamilton, 2002; Triantafillou, 1998; Sadatmanesh, 1994; Reinhorn y Maden, 1995; Schwegler, 1994). Sin embargo, esta puede ser impráctica y costosa debido a que la superficie se limpia y envuelve con adhesivo epóxico. Propuestas mas actuales incluyen el método de reforzamiento con varillas FRP alojadas sobre ranuras en la superficie de concreto reforzado o mampostería (De Lorenzis et al., 2000; Tumialan et al., 2002).

1.2 Justificación

La mayoría de viviendas en la ciudad de Querétaro se han construido con técnicas convencionales y materiales relativamente fáciles de obtener y de trabajar. El proceso constructivo más utilizado consiste en hacer cimentaciones de mampostería con piedra o de concreto reforzado, muros de mampostería de tabique rojo recocido o tabicón de concreto y losas de concreto reforzado para los sistemas de piso o cubiertas. Se estima que el 92.9 % de viviendas cuenta con muros construidos a base de tabique, block, piedra, o cantera. Por consiguiente, es necesario efectuar trabajos de investigación experimentales para establecer normas y códigos de diseño locales, que regulen las características deseables de los materiales utilizados en la construcción.

El motivo de esta investigación fue desarrollar dos técnicas de reforzamiento con dos diferentes materiales compuestos para reforzar mampostería de tabique. Se pretende contrarrestar algunos de los inconvenientes de las técnicas convencionales de reforzamiento. En particular, se evaluó la eficacia como material de refuerzo para mampostería, de los materiales compuestos desarrollados.

1.3 Objetivo

Evaluar la eficacia de las varillas FRP y tiras de mortero geopolimérico, como material de refuerzo para mampostería de tabique. Por medio de la resistencia al cortante de muretes reforzados con tales materiales bajo carga de compresión sobre la diagonal.

1.4 Hipótesis

La resistencia al cortante de la mampostería de tabique sin refuerzo se incrementa cuando esta es reforzada con varillas FRP ó con tiras de mortero geopolimérico.

1.5 Resumen y contenido de la tesis

En este trabajo de investigación se presentan dos propuestas de reforzamiento con materiales compuestos para mampostería de tabique sin refuerzo. Para tal efecto, se desarrollaron dos materiales compuestos con diferente matriz polimérica. Con matriz polimérica orgánica y fibra continua se fabricaron varillas de polímero fibro-reforzado (FRP), mientras que con la matriz polimérica inorgánica se fabricaron tiras de mortero geopolimérico reforzado con malla de alambre de tejido hexagonal. En ambas propuestas, los materiales compuestos fueron aglutinados con adhesivo epoxico sobre la superficie de la mampostería.

El programa experimental consistió en ensayar muretes (muros pequeños) reforzados y no reforzados de tabicón sólido de cemento, bajo cargas de compresión continua y cíclica (carga-descarga) sobre su diagonal. Esto para inducir una falla por cortante (agrietamiento) sobre la diagonal de los muretes. El comportamiento estructural de los muretes se valoró por medio del cálculo del esfuerzo y deformación cortante, y del módulo de rigidez. Los resultados muestran que la resistencia y el módulo de rigidez de los muretes reforzados con los diferentes materiales compuestos, son mayores a los valores obtenidos con los muretes sin refuerzo. Se obtuvo además, mayor estabilidad al momento de la falla (no hay pérdida de material). Por lo tanto, los materiales y la alternativa de reforzamiento propuesto funcionaron adecuadamente presuponiéndose que pueden ser una alternativa viable de reforzamiento y rehabilitación para mampostería de tabique no reforzada.

Este trabajo se divide en cuatro capítulos, los cuales, se enfocaron sobre el principal tópico de la investigación. En el capítulo 1 se presenta la introducción del trabajo, mientras que en el capítulo 2, se pone en contexto el objeto de estudio relacionado con los materiales compuestos con matriz polimérica orgánica e inorgánica. En la sección del marco teórico se proporcionan los conceptos básicos relacionados con las variables de estudio, lo cual, incluye una revisión del estado del arte.

En el capítulo 3, se describen los materiales y procedimientos utilizados para caracterizar a los materiales compuestos (materiales con matriz polimérica orgánica e inorgánica) utilizados en el refuerzo de la mampostería. Además, se describen los procedimientos experimentales utilizados para evaluar el comportamiento estructural de la mampostería de tabique reforzada con los materiales compuestos obtenidos. En el capítulo 4, se presentan y se discuten los resultados obtenidos de las propuestas de reforzamiento en elementos estructurales utilizando los materiales desarrollados.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se plasma el contexto y el marco teórico relacionado con los materiales compuestos desarrollados y su aplicación como refuerzo en elementos estructurales. El marco teórico incluye los conceptos básicos relacionados con las variables de estudio, y se hace una revisión del estado del arte.

2.1 Materiales compuestos

Al contrario de lo que se pudiera pensar, el concepto y filosofía de material compuesto es tan antiguo como la naturaleza misma. Los árboles, auténticas estructuras resistentes de elevada altura en algunos casos y sometidos a esfuerzos considerables (viento, peso propio, etc.), están constituidos por una serie de fibras de madera y resinas naturales. Las fibras soportan los esfuerzos mecánicos y las resinas configuran la estructura final (Murphy, 1998). Otros ejemplos de materiales compuestos en la naturaleza son el hueso, el bambú, los músculos, etc. El hombre, fijándose en tales ejemplos ha realizado materiales compuestos artificiales; aleaciones de acero, resinas reforzadas con fibra, concreto armado, neumáticos, tabiques de adobe y paja etc.

Durante la Segunda Guerra Mundial se inicia de forma muy esporádica la utilización de polímeros orgánicos y materiales compuestos para la construcción (ACI 440, 2006). Se utilizó el poliéster reforzado con fibra de vidrio debido a su neutralidad ante las ondas electromagnéticas, para la fabricación de las primeras casetas para equipos de radares electrónicos. Gradualmente fue reconocida la facilidad para tomar formas complejas en su moldeado, por los diseñadores y, a comienzo de los cincuentas se utilizaba para fabricar láminas translúcidas. En la actualidad las fibras de refuerzos más utilizadas son la fibra de vidrio y fibra de carbono. Los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono suelen ser utilizados en las industrias aeroespacial y aeronáutica, mientras que los reforzados con fibras de vidrio son más utilizados en la industria de la construcción.

Actualmente, el mercado mundial de “composites” crece al 5,7% anual desde 1994. En el 2000, se produjeron siete millones de toneladas, correspondiendo a más del 95% a compuestos de gran difusión. Esta producción alcanzó 10 millones de toneladas en 2006, y se estima que del 70 al 75% corresponde a compuestos termoestables y del 25 al 30% son compuestos termoplásticos. Los compuestos termoplásticos aparecieron a principios de los años ochenta, son más recientes y también más prometedores. Sin embargo, los materiales compuestos termoestables representan aún, más de las dos terceras partes del mercado (Chalaye, 2002). El crecimiento es más favorable para compuestos termoplásticos que para compuestos termoestables, debido a que se pueden reprocesar de manera mucho más fácil. Se podría por tanto hablar del siglo XXI como la edad de los materiales compuestos ó composites, los cuales, se han convertido en un elemento muy común en nuestras vidas sin apenas darnos cuenta (Miller, 1998; Kaw, 1997).

Cabe reconocer que el uso de estos materiales en la industria de la construcción en las dos últimas décadas ha crecido de forma considerable, sin embargo, su uso aun no se ha generalizado debido a la falta de códigos de diseño. Además, no se han estandarizado los procesos de fabricación del material compuesto fibro-reforzado. Con mucha reserva se han utilizando guías de diseño como las del ACI-440 para proyectos específicos. Uno de las exigencias actuales principales para un material compuesto es que trabaje en las tres dimensiones (normalmente sólo lo hace en dos). Para ello se está experimentando en lo que se denomina la arquitectura textil. En función de cómo se dispongan las fibras se puede lograr un trenzado en 3D. Tan solo es cuestión de saber como tirar de la fibra y como girar las bobinas. Ejemplos de ello son el 3D Weaving, el Stitching y el 3D Braiding, aunque ninguno de ellos por el momento se ha desarrollado completamente (Kamiya et al., 2000).

2.2 Tipos de matrices poliméricas

Si bien en muchos casos los términos “polímeros”, “macromoléculas”, y “plásticos” se han utilizado como sinónimos se suele aducir a una diferencia en cuanto a su definición. Así una macromolécula sería un compuesto químico formado por “n” unidades estructurales repetidas (n-meros), las cuales serían los “monómeros” que les dieran lugar.

El termino polímetro se referirá a una macromolécula sintética, y finalmente un plástico sería un polímero adicionado y acondicionado para su uso en la industria. Las macromoléculas pueden estar unidas entre si mediante fuerzas de diversa intensidad. Así cuando sean de baja intensidad, podremos separarlas con un simple calentamiento dando lugar al plástico fundido. Los polímeros con esta característica son los llamados “Termoplásticos”, los cuales, se funden o plastifican con un suministro de calor, estos polímeros pueden ser reciclados. Cuando las fuerzas de unión son tan intensas las macromoléculas se rompen antes de separarse al calentarlas, lo que implica que al incrementar la temperatura no podrán cambiar de estado sólido a líquido, denominando a estos polímeros Termoendurecible o “Termoestables”.

Tabla 2.1 Tipo de matrices para materiales compuestos

Tipo de Matriz		
Matriz Orgánica		Matriz Inorgánica
Termoestables	Termoplásticas	
Epoxi, Vinílester, Poliéster, Fenolica, Esteres cianato, Bismaleimidias, Polimidias, Polieteramida.	Policloruro de vinilo (PVC), Copolímero de estireno (ABS, SAN), Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Policarbonato (PC), Polimetacrilato de metilo (PMMA), Acetato, Poliestireno (PS), Polioximetileno (POM), PBT, Polieterimida, PET, Nylon, Poliamida, PEEK, PEKK, PAI, PAS	Cemento, Yeso, Geopolímero, Matrices ceramicas, Matrices metálicas.

2.3 Métodos de fabricación para materiales compuestos

Para elegir el procedimiento de fabricación, hay que basarse no sólo en la naturaleza del material (termoplástico o termoestable), sino también en la forma de la pieza a realizar, las propiedades deseadas y la cantidad a producir. Los compuestos destinados a los mercados de gran difusión (automóvil, electricidad, construcción) requieren procedimientos muy automatizados de alta productividad. El uso de materiales pre-impregnados en forma de hojas o de granulados permite obtener productos por compresión o inyección en poco tiempo. La mezcla de constituyentes elementales (resina, refuerzo, catalizador, cargas) puede llevarse a cabo previamente a la conformación definitiva del producto por estampado, compresión o moldeo.

Los procedimientos para compuestos con altas propiedades son aún manuales o poco automatizados. Son compatibles con la producción en pequeñas series de piezas de alto valor añadido (aeronáutica, deportes y recreo, medicina). El moldeo en contacto (hand lay-up, pressure bag holding) y la proyección simultánea (spray-up method) son, por su parte, procedimientos manuales adaptados a la producción en pequeñas series de piezas, tanto a base de composites de gran difusión como de composites de altas prestaciones. Lo mismo sucede con los procedimientos de fabricación, como el arrollamiento filamentario (filament winding) y la centrifugación. Estos procedimientos permiten realizar cuerpos huecos de revolución de grandes dimensiones como son los tanques destinados a la industria química y las tuberías de centrales eléctricas. Los productos de gran longitud (vigas, perfiles y placas) se fabrican por procedimientos de impregnación en continuo (Pultrusión).

2.4 Proceso de pultrusión

La palabra pultrusion se usa para describir un proceso de fabricación comercial para la producción de materiales compuestos fibro-reforzados. La primera mención del proceso se registro en una patente en 1951 con el trabajo hecho en los años cincuentas atribuido a W. Brandt Goldsworthy. Él desarrollo gran parte del proceso y fabricó el equipo para producir elementos estructurales por este método. El proceso tiene relación con la extrusión, que se usa principalmente con metales, y describe el proceso de conformar una forma geométrica usando un dado cerrado y empujar los materiales metálicos normalmente calientes a través del dado. El proceso de pultrusion difiere en que este toma ventaja de la resistencia longitudinal de las fibras continuas, para jalar el perfil extruido a través del dado caliente de conformado (zona de curado) para crear una sección transversal del material compuesto.

Por lo tanto, el producto final se obtiene usando fibras longitudinales y resina termoestable para producir un perfil estructural, el cual, tiene mayor resistencia en la dirección longitudinal y propiedades diferentes relacionadas con la resina en dirección

perpendicular a la fibra. El reforzamiento multi-direccional se usó extensivamente en los comienzos de los 70's (Taft, 1984) a partir de que fue posible incluir capas de telas, tapetes y velos de fibra enrollados interna y superficialmente. A partir de tales desarrollos y la introducción de matrices poliméricas en base de resinas termoplásticas, ha canalizado la utilización del proceso de pultrusion en la industria aeroespacial, militar y aeronáutica, debido a que es un proceso relativamente barato para producir una sección transversal constante para perfiles estructurales. Las ventajas del proceso de pultrusion son: a) Producción continua, b) Bajos requerimientos laborales, c) Poco material de desecho, d) Eliminación de material de apoyo, i.e. respiradores, tela, película separadora, empaquetado de película, cinta de borde.

2.5 Tipos de fibra de refuerzo utilizadas en materiales compuestos

El refuerzo de polímero fibro-reforzado (FRP) se hace típicamente con una de tres tipos de fibras: Aramid (aromatic polyamide, poly paraphenylene terephthalamide), Carbón y Vidrio. La selección de esas fibras se basa principalmente considerando costo, resistencia, rigidez, y estabilidad a largo plazo. Las fibras de aramid tienen alta resistencia y rigidez pero su fractura es de manera dúctil. Las fibras de carbón son también de alta resistencia y rigidez comparando con el acero (estas fibras son muy populares en la industria aeroespacial pero por su alto costo no pueden ser muy utilizadas en aplicaciones de la industria de la construcción).

Las fibras de vidrio son de varios tipos dependiendo de sus propiedades y composición química: E-Glass, S-2 Glass, AR- Glass, A-Glass, C-Glass, D-glass, R-Glass y ECR-Glass. Las fibras tipo "E" son las más usadas en aplicaciones de ingeniería civil debido a su relativo bajo costo, alta resistencia, y resistencia a la temperatura. Los compuestos FRP que se obtienen a partir de fibras de vidrio son conocidos como "GFRP", y los obtenidos con fibras de aramid son conocidos como "AFRP", y a su vez los obtenidos con fibras de carbono son conocidos como "CFRP".

2.6 Matriz polimérica inorgánica y cementantes geopoliméricos

Así como los compuestos que contienen enlaces C-C dominan nuestro mundo viviente, los compuestos con enlaces Si-O dominan el mundo mineral. La gran variedad de silicatos en la corteza terrestre coloca al silicio como segundo elemento en abundancia sobre la tierra. En forma sorprendente, el silicio muestra importantes diferencias en sus propiedades químicas comparado con el carbono. Mientras que en los compuestos del carbono predominan los enlaces C-C y C-H, en los compuestos del silicio son los enlaces Si-O, y no los enlaces Si-Si o Si-H. Otra diferencia es que no hay compuestos del silicio comparables a los aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, y ésteres., que retienen oxígeno por un doble enlace covalente.

Los geopolímeros son materiales cementantes de aluminosilicato tridimensionales amorfos, los cuales, fueron descubiertos primeramente en los años cincuenta por el Prof. Glukhovsky en la Unión Soviética. Davidovits (1989) en Francia también empezó trabajos similares en los 70s y lo llamó Geopolímero. Los materiales cementantes geopoliméricos pueden ser sintetizados mezclando los materiales reactivos de aluminosilicato (como el metakaolin) y las soluciones alcalinas fuertes (como NaOH o KOH), curando entonces a temperatura ambiente. Bajo una solución alcalina fuerte, los materiales reactivos de aluminosilicato se disuelven rápidamente para formar unidades de radicales libres tetraédricas de SiO₄ y AlO₄. Conforme se desarrolla la reacción, el agua se separa gradualmente y las unidades tetraédricas SiO₄ y AlO₄ se unen alternativamente para producir los precursores poliméricos (-SiO₄-AlO₄-, -SiO₄-AlO₄-SiO₄-, ó -SiO₄-AlO₄-SiO₄-SiO₄-), compartiendo los átomos de oxígeno entre dos unidades tetraédricas y por consiguiente formando el geopolímero amorfo. De acuerdo a la estructura, los geopolímeros pueden ser expresados por la fórmula empírica siguiente (Davidovits, 1993):



Donde, “R” es un catión como el potasio y sodio; “n” es el grado de poli-condensación; “z” es 1, 2, y 3; y w es la cantidad de agua necesaria.

Comparado el cemento de Portland con el Geopolímero, este posee las características siguientes (Lyon, 1997):

- La producción de cemento geopolimérico requiere relativa baja temperatura (600-800 °C) y emite menos CO₂.
- Puede obtenerse una resistencia razonable en un período corto de tiempo a temperatura ambiente. En la mayoría de los casos, 70% de la resistencia a compresión final se desarrollan en las primeros 4 h de fraguado.
- Aparte de su alta resistencia temprana, baja permeabilidad, y resistencia al fuego y a ácidos, los geopolímeros logran también alta resistencia a la compresión sin confinamiento y se encogen mucho menos que el cemento Portland.
- Otras propiedades documentadas incluyen buena resistencia a ciclos de congelamiento-descongelamiento, así como excelente solidificación de iones de metales pesados contenidos dentro de la estructura del geopolímero.

Estas propiedades hacen que los cementantes geopoliméricos sean un fuerte candidato para sustituir al cemento Portland en aplicaciones del campo de la Ingeniería Civil; puentes, pavimentos, hidráulica y la ingeniería militar (Mouret, 1999). El cemento geopolimérico es una nueva generación de materiales cementantes inorgánicos Si-Al, los cuales, son muy diferentes al cemento Portland en los aspectos de la microestructura, composición química, y proceso de hidratación.

2.7 Ferrocemento

El ferrocemento es un concreto reforzado de pared delgada comúnmente construido de mortero de cemento hidráulico reforzado con capas cercanamente espaciadas de malla de alambre continuo y de diámetro pequeño (ACI Committee 549, 1997). Su rol como un compuesto laminado en base de cemento, se encuentra en numerosas aplicaciones como estructuras nuevas y rehabilitación de estructuras existentes. Comparando con el

concreto reforzado convencional, el ferrocemento tiene reforzamiento en dos direcciones; por lo tanto, se considera que se tienen propiedades isotrópicas y homogéneas.

Debido a su usual alta relación de reforzamiento, el ferrocemento generalmente tiene alta resistencia a la tensión y un modulo a la ruptura alto. Debido a que la superficie específica del refuerzo, es uno o dos veces más alto que en el concreto reforzado, se desarrollan grandes fuerzas de adherencia con espaciamientos y ancho de agrietamiento promedio un orden menor que en el concreto reforzado convencional. (Shah y Naaman, 1978). Otra característica del ferrocemento incluye facilidad de fabricación y bajo costo en mantenimiento y reparación. En base de las ventajas mencionadas, las aplicaciones típicas del ferrocemento incluyen tanques de agua, botes, paneles para muros de casa habitación, techos, etc. (Guerra et al., 1978; Kadir et al., 1997).

Hasta ahora la malla de acero ha sido la principal malla de refuerzo para ferrocemento, sin embargo, actualmente se han introducido mallas de fibra de refuerzo para polímeros están introduciéndose como una alternativa promisorio para sustituir a la malla de acero (Naaman y Chandransu, 2000; Lopez y Naaman, 1998; Wang, et al., 2004). Comparada con el acero, el refuerzo de fibras continuas tiene algunas características recomendables; ligereza, alta resistencia a tensión e inherente resistencia a la corrosión. Sin embargo, a diferencia del acero que tiene un comportamiento elasto-plástico, las fibras continuas para materiales FRP tienen un comportamiento elástico-frágil hasta la falla.

Como compuesto laminado, el ferrocemento sufre frecuentemente de astillamiento severo de la cubierta de la matriz y delaminación de la capa externa a tensión con alta relación de reforzamiento, resultando en fallas prematuras. Por lo tanto, deberá considerarse el criterio de serviceabilidad en el diseño del compuesto, más que la resistencia al límite. Una lógica solución para resolver o aliviar tales problemas es la adición de fibras cortas discontinuas a la matriz de cemento, lo cual, podría producir mejoras significativas en ductilidad y capacidad a cortante así como incremento moderado en resistencia a tensión.

La matriz en el ferrocemento tiene 95% o más influencia sobre el comportamiento del producto final (ACI Committee 549, 1997), el cual, depende completamente sobre la composición de la mezcla del mortero. Investigaciones como las de Kumar et al. (2002), han estudiado las características de las mezclas de morteros tradicionales para usarse en el ferrocemento. En el trabajo de Memon et al. (2007) reportan el uso de slag (escoria granulada) como agente cementante, mientras que Masood et al. (2003) utilizo fly ash (ceniza volante) para sustituir una porción en peso del cemento Pórtlan para la elaboración del mortero, tanto el slag y el fly ash son considerados desechos industriales. Ambos trabajos reportan variantes en la utilización de matrices cementantes diferentes a las tradicionales con buenos resultados en la durabilidad y propiedades mecánicas.

Por consiguiente, la utilización de morteros geopoliméricos es una buena alternativa para ser utilizada en el ferrocemento. Lo cual, coincide con la necesidad de desarrollar nuevas matrices en base de materiales diferentes a los tradicionales y que además sean ecológicos.

2.8 Elementos estructurales reforzados con materiales compuestos

2.8.1 Concreto reforzado

Hoy en día, debido a la buena aceptación de los polímeros fibro-reforzados (FRP) en la industria automotriz y aeroespacial, se han considerado para ser utilizado como refuerzo en estructuras de concreto y mampostería. Las ventajas de este material compuesto son: alta resistencia a tensión, ligereza, resistencia a la corrosión, propiedades no magnéticas, etc. (Nanni, 1993; Benjamin, 2003; Malavar, 1998; Neville, 1999). No obstante, antes de utilizar este material como varilla de refuerzo en elementos de concreto reforzado, se requiere obtener una filosofía de diseño (códigos de diseño) en base de las características mecánicas y físicas de las varillas FRP. Para tal objetivo, se parte de dos consideraciones: a) ajustar las normas existentes de diseño, ó b) escribir nuevas reglas de diseño. La segunda opción es técnicamente más correcta, pero es un proceso costoso y tardado, por lo que, la modificación de las normas existentes es la única opción factible.

A pesar que no se tienen filosofías de diseño para utilizar las varillas FRP como refuerzo en elementos de concreto reforzado a nivel mundial se han desarrollado guías de diseño (CSA-S806, 2002; ACI 440, 2006; JSCE, 1997; Sonobe et al., 1997), en base de la modificación de los códigos de diseño aceptados para diseñar concreto reforzado con varillas de acero. Al respecto se cree que la conclusión de códigos ó normas de diseño se ha dificultado, debido a la falta de estandarización tanto del diseño del material compuesto fibro-reforzado (configuración geometría, cantidad de constituyentes) como del proceso de fabricación. Se debe mencionar que tales guías de diseño se han concretado en base de trabajos de investigación de, los cuales, en el párrafo siguiente se mencionan sus contribuciones sobre la temática.

Nawy y Neuwerth (1997), demostraron que a partir del modelo de análisis por secciones usado para vigas de concreto reforzado con varillas de acero, se puede predecir la capacidad de deformación de las vigas de concreto reforzado con varillas GFRP. Theriault y Benmokrane (1988), Houssam y Yong (2003), analizaron la resistencia, el agrietamiento y las deflexiones de las vigas de concreto reforzado con refuerzo FRP, en base de la máxima deformación del concreto; 0.0035 in/in. Por su parte, Saadatmanesh and Ehsani (1991), Shapira and Bank (1997), no observaron desprendimiento de las varillas en ensayos a flexión de vigas de concreto reforzadas con varillas GFRP.

Nanni (1993) por su parte ha propuesto modelos analíticos para calcular la resistencia de las vigas de concreto reforzadas con varillas FRP, en base de la deformación a la falla tanto para el concreto como para las varillas de refuerzo. Yost et al. (2001) ensayaron vigas de concreto reforzadas con varillas FRP, las cuales, se diseñaron considerando adherencia perfecta entre la varillas y el concreto. En tal experimentación se observó que tales vigas fallaron a una carga de 46-70% de su capacidad a flexión, además, se observó el desprendimiento del refuerzo longitudinal en el anclaje. Razaqpur et al. 2000 propuso un modelo analítico, en base de una variación tri-lineal de la relación momento-curvatura, para calcular las deflexiones de las vigas de concreto reforzadas con varillas FRP. Por otra parte el estudio experimental conducido por Xiao et al. (2004) sobre la

adherencia de varillas FRP-concreto, indicó que el esfuerzo cortante de adherencia es tan bajo como 1.287 MPa.

2.8.2 Mampostería

Los muros de mampostería de piezas artificiales están formados básicamente por dos elementos, por un lado piezas prismáticas que forman los ladrillos o bloques, y por otro el mortero que se utiliza para unir dichas piezas prismáticas. En la producción de piezas artificiales existe una gran diversidad, tanto en la calidad de la materia prima utilizada, en los procesos de manufactura y en las formas geométricas que se comercializan. En los morteros que se utilizan en la pega de piezas también existe una gran variabilidad, dado que frecuentemente se utilizan proporcionamientos en volumen de los ingredientes básicos (cemento hidráulico, cemento de albañilería, cal, arena y agua). Además, frecuentemente se utilizan distintos espesores de junta de mortero para pegar a las piezas, que son función del tipo de pieza, de la modalidad de la mampostería que se utiliza, así como del conocimiento y práctica profesional de cada región. Por lo tanto, se dificulta establecer una descripción general del comportamiento mecánico de la mampostería, y en muchas ocasiones hace poco confiable la extrapolación de resultados de un tipo de mampostería a otro.

Mampostería reforzada y no reforzada

La mampostería no reforzada es aquella que: (a) no cuenta con refuerzo en el interior de las piezas y, (b) no tiene refuerzo adosado a las piezas, ya sea embebido entre el mortero que une a las piezas (como por ejemplo en el caso de la escalerilla o de varillas de acero colocadas entre hiladas), o bien cuando esté adosado en una o ambas caras exteriores del muro (como en el caso de mallas electrosoldadas clavadas a la mampostería y embebidas en el recubrimiento de mortero) (NTCM-2004). En México se utilizan distintas modalidades de refuerzo, siendo común las siguientes: (a) Mampostería confinada, donde se utilizan elementos adicionales de concreto reforzado cuya finalidad es aumentar el confinamiento del muro y mejor con ello su capacidad para resistir cargas verticales y laterales, aumentando en este último caso su resistencia y su deformación lateral y, (b) Mampostería reforzada, donde se agrega acero de refuerzo en la dirección vertical mediante el uso de piezas huecas y en la dirección horizontal en las juntas de mortero y/o empleando

piezas especiales (conocidas como media cañas), cuya finalidad es también mejorar notablemente la capacidad de resistir cargas verticales y laterales, al aumentar en este último caso tanto su resistencia como su capacidad de deformación lateral (NTCM-2004).

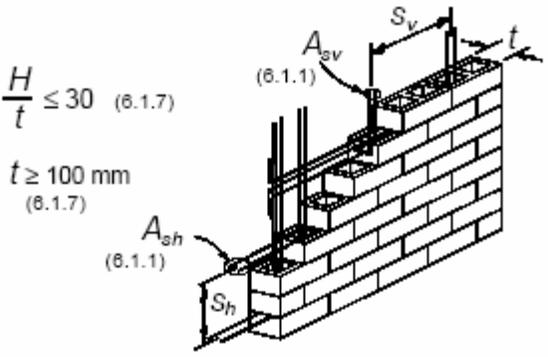
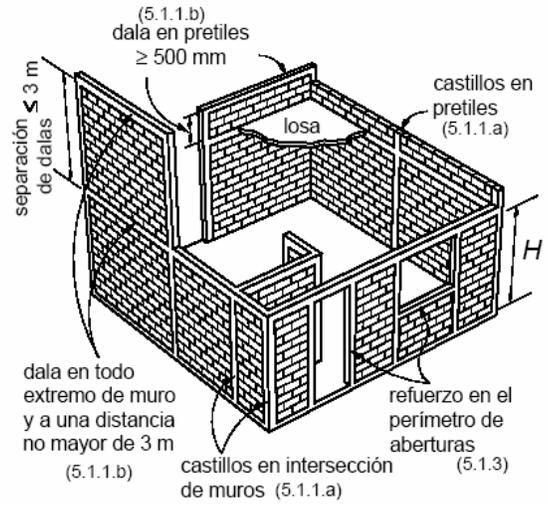


Figura 2.1 a) Mampostería confinada, b) Muros reforzados interiormente (NTCM-2004).

Comportamiento de la mampostería bajo tensión diagonal

Una estructura de mampostería estará sometida durante su vida útil principalmente a los siguientes efectos:

- 1) Carga vertical debida al peso de las losas, de las cargas vivas y a su peso propio.
- 2) Fuerzas cortantes y momentos de volteo (flexión) originados por las fuerzas de inercia durante un sismo.
- 3) Empujes normales al plano de los muros que pueden ser causados por empuje de viento, tierra o agua, así como por fuerzas de inercia cuando el sismo actúa normal al plano del muro.

Ante las acciones mencionadas puede ocurrir la falla de la mampostería, por lo que es conveniente conocer el comportamiento y los tipos de falla que se puede presentar en ellas independientemente de la existencia o no del refuerzo. La falla por carga axial es muy poco probable que ocurra debido a que el área de los muros es grande; podría ocurrir si las piezas son de muy mala calidad, o porque han perdido capacidad de carga por efecto del intemperismo. Se identifica esta falla porque el material literalmente se aplasta cuando es de baja calidad, o si es de buena calidad, aparecen numerosas grietas verticales.

Existen muchas situaciones en las que un muro de mampostería puede estar sometido a tensión diagonal, el efecto de las cargas sísmicas es una de las situaciones más importantes. Sin embargo, existen otras situaciones en las que se pueden producir este tipo de sollicitación en la mampostería, por ejemplo, cuando se producen hundimientos diferenciales en una edificación de mampostería, o bien aún bajo la acción de cargas gravitacionales cuando existe una distribución poco uniforme de cargas verticales en un determinado muro. De ahí que sea muy importante conocer el comportamiento mecánico de la mampostería no-reforzada bajo este tipo de sollicitaciones, pues es el tipo de acción que con mayor frecuencia produce su falla.

Para estudiar el comportamiento de la mampostería en tensión diagonal se utiliza un ensayo de compresión diagonal. El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo de la diagonal de un murete de geometría cuadrada, con dimensión mínima por lado de una y media piezas. Tal carga le induce al murete un estado de esfuerzos de tensión a lo largo de la diagonal en dirección perpendicular a la diagonal, en consecuencia la mampostería se agrieta debido a que el esfuerzo resistente a la tensión es mucho menor que el esfuerzo resistente a la compresión. El agrietamiento se forma generalmente a lo largo de las juntas, propiciadas por la debilidad de la unión pieza-mortero; sin embargo, para piezas con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan indistintamente piezas y mortero (Magenes, 1997; Tomazevic, 1999). En la figura siguiente se observan los principales modos de falla.

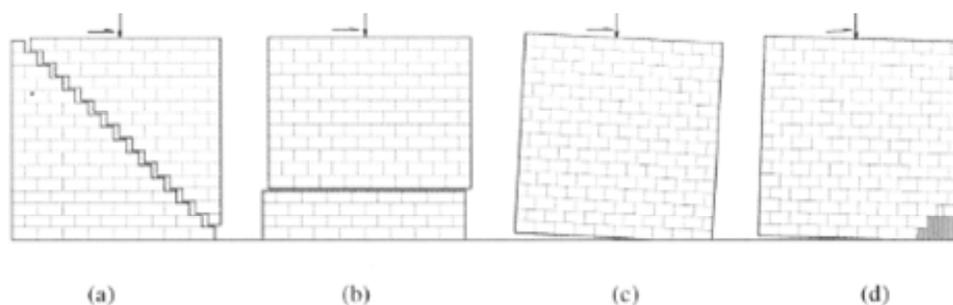


Figura 2.2 a) Falla por cortante, b) por deslizamiento de juntas horizontales, c), d) por aplastamiento en la base (Tomazevic, 1999).

Comportamiento de la mampostería confinada ante cargas laterales

Es importante hacer notar que la mampostería confinada tiene un comportamiento mecánico muy diferente a la mampostería no-reforzada, y que cuando los elementos confinantes tienen un número, ubicación y detallado adecuado, la mampostería confinada es un excelente material para ser usado en edificaciones para vivienda de poca altura aún en zonas de alta sismicidad. La mampostería confinada también se usa con mucho éxito en otros países latinoamericanos y su efectividad ha llamado poderosamente la atención en la región de los Balcanes en Europa, donde ya también se utiliza. Para el ingeniero estructuralista es importante estar consciente que la función principal de los castillos no es incrementar la capacidad máxima del muro ante cargas laterales, sino la de aumentar su capacidad de deformación y la de postergar y disminuir la degradación de resistencia.

Si bien el ensaye de compresión diagonal permite obtener índices, como la resistencia al esfuerzo cortante de la mampostería y el módulo de rigidez a cortante, este tipo de prueba no es totalmente representativa del comportamiento de un muro bajo cargas laterales, ya que en ella no existen deformaciones ni esfuerzos por flexión, como ocurre en muros sometidos a cargas laterales (particularmente si son esbeltos), por ejemplo, como las que se producen en edificaciones de mampostería sometidas a sollicitaciones sísmicas. La prueba de un muro ante cargas laterales consiste en probar al espécimen en voladizo, induciéndole esfuerzos cortantes simultáneamente con esfuerzos de flexión. En el caso particular de los muros de mampostería confinada, su comportamiento ante cargas laterales es muy semejante al que se tiene en el ensaye de compresión diagonal. Sin embargo, debido a la presencia de flexiones que disminuyen los esfuerzos verticales en un extremo del muro y los incrementan en el otro, la fuerza cortante que produce el agrietamiento es menor cuando el ensaye se realiza en voladizo que cuando se efectúa en compresión diagonal.

De los resultados de ensayos en voladizo realizados en su mayoría en el Instituto de Ingeniería de la UNAM en las décadas de los años sesenta y setenta, se vio que los esfuerzos de agrietamiento varían en un intervalo muy estrecho (2 a 3 kg/cm²), mientras que los esfuerzos máximos resultaron bastante mayores y variaron en un intervalo un poco más amplio. Las resistencias menores correspondieron a tabiques que presentaban una adherencia muy baja con el mortero. La deformación angular a la cual ocurre el agrietamiento varió entre 0.0015 y 0.0025 cuando el ensaye fue en voladizo, mientras que para pruebas en compresión diagonal el agrietamiento ocurre para deformaciones menores (0.0005 a 0.0015).

La grieta diagonal se forma inicialmente en el centro del muro y se prolonga rápidamente hacia los extremos. Su inclinación es usualmente la de la diagonal, aunque tiende a ser más horizontal si el ensaye es en voladizo y cuando se aplican al muro cargas verticales. En cuanto a los tipos de falla, se presenta la falla por las piezas en muros de piezas débiles y de superficies rugosas que tienen buena adherencia con el mortero; también es típica de muros en los que existen esfuerzos de compresión altos en dirección

normal a las juntas. En los ensayos realizados se observó este tipo de falla en muros de tabique recocado, algunos de bloque de concreto y en tabiques ligeros. La falla en las juntas se presenta en muros formados por piezas de alta resistencia o de escasa adherencia con el mortero por sus superficies lisas o por tener huecos grandes, y en muros en los que existen esfuerzos verticales muy bajos o nulos.

En el caso de muros de mampostería confinada por medio de dalas y castillos (por ejemplo, muros de mampostería confinada), su comportamiento hasta el primer agrietamiento diagonal es prácticamente el mismo al de los muros de mampostería no-reforzada, lo que implica que la presencia y características de las dalas y castillos no tiene una influencia significativa en el comportamiento de la mampostería antes de que se produzca el primer agrietamiento diagonal. Después del agrietamiento diagonal existe una importante redistribución de esfuerzos, y el puntal de compresión de la mampostería incrementa significativamente las demandas de flexión, pero principalmente de cortante en los extremos de los castillos. Este incremento en fuerza cortante puede producir la falla del castillo en la esquina, dando lugar a una reducción drástica de la capacidad resistente del muro.

Si la sección y armado del castillo en su parte inferior y superior es capaz de resistir esta fuerza cortante, el muro confinado puede soportar cargas laterales adicionales que provocan generalmente la formación de nuevas grietas con inclinaciones menores que la diagonal. Esto da lugar a un modo de falla, en el cual el sistema puede idealizarse como dos bloques rígidos de muro que actúan sobre dos tramos cortos de los castillos. En este sistema idealizado, la fuerza lateral se resiste en parte por fricción y anclaje mecánico a lo largo de la grieta y en parte por la resistencia a cortante de los castillos en los extremos de la grieta. La falla puede ocurrir nuevamente por cortante en los castillos, o si estos tienen resistencia suficiente en cortante, existe reserva de carga importante hasta que los dos tramos cortos de los castillos llegan a articularse, y el conjunto es capaz de soportar deformaciones muy grandes.

2.8.3 Reparación y rehabilitación de mampostería

Los factores que pueden causar fallas en las estructuras de mampostería son: debilidad estructural, sobrecargas, vibración dinámica (sísmica o ambiental), hundimientos diferenciales, y deformaciones dentro y fuera del plano. Las mamposterías no-reforzada y de adobe son más propensas a agrietarse por su debilidad estructural, y estos tipos de mampostería representan una gran porción de construcciones alrededor del mundo. Al respecto, se ha reparado y reforzado la mampostería existente, usando materiales y técnicas de construcción convencionales; es decir, con placas de ferro-cemento, mortero lanzado, inyección de mortero, pos-tensado, refuerzo externo de concreto o acero (mallas electro-soldadas, grapas de acero). Sin embargo, aunque tales técnicas han mostrado resultados satisfactorios, tienen las siguientes desventajas (ElGawady et al., 2004; Alcocer, 2003): tiempos largos de aplicación, reducción de espacios, afectación de la estética de la mampostería, etc. Además, con estas técnicas se incrementa las fuerzas inerciales inducidas sísmicamente, repercutiendo en tener que reforzar las cimentaciones.

Debido a los inconvenientes mencionados anteriormente, hoy en día, surgen como una alternativa viable las propuestas de reforzamiento o rehabilitación con materiales compuestos. Con buenos resultados, la mayoría de las propuestas de reforzamiento y rehabilitación utilizan láminas de polímero fibro-reforzado (Holbert y Hamilton, 2002; Triantafillou, 1998; Sadatmanesh, 1994; Reinhorn y Maden, 1995; Schwegler, 1994). Sin embargo, se debe de mencionar que algunas de las propuestas pueden ser impracticables y costosas, debido a que, el total de la superficie de la mampostería debe ser preparada, limpiada, y cubierta con adhesivo epóxico para recibir las láminas. Además, muchas de esas técnicas se encuentran en fase de investigación experimental.

Por lo tanto, como otra alternativa de reforzamiento y rehabilitación con materiales compuestos, en este trabajo de investigación se trabajarán con dos tendencias actuales. La primera, considera utilizar varillas de polímero fibro-reforzado pegadas superficialmente con adhesivo epóxico, siguiendo la tendencia de los trabajos de investigación de De Lorenzis et al. (2000) y Tumialan et al. (2002), pero con la diferencia de no alojar las

varillas en las juntas de los tabiques. La segunda tendencia, considera el utilizar tiras de ferro-cemento fabricadas con un mortero geopolimérico (material compuesto con matriz polimérica inorgánica).

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los materiales y métodos utilizados para construir y evaluar el comportamiento estructural de la mampostería de tabique reforzada con materiales compuestos de matriz polimérica orgánica e inorgánica.

3.1 MATERIALES

3.1.1 Varillas de polímero fibro-reforzado (FRP) y adhesivos

Matriz polimérica y tipos de fibras

Se utilizó una resina termoestable de poliéster bisfenólica de bajo costo resistente a soluciones alcalinas (DSM Composite Resins, 2006) para obtener la matriz polimérica de las varillas FRP. Para una adecuada impregnación de las fibras, la viscosidad de la resina se mantuvo dentro del intervalo de 560-660 cps (centipoises) a 25°C. Esta es una adecuada elección para ser utilizada en concretos y mamposterías de tabique, dado que estos materiales al humedecerse son altamente alcalinos y pueden deteriorar a las fibras de refuerzo a largo plazo. Las propiedades mecánicas de la matriz polimérica se presentan en la Tabla 3.1.

Se utilizaron dos tipos de fibra para reforzar la matriz polimérica: fibra de vidrio tipo-E con un diámetro de filamento de 10-13 μm , y fibra basáltica con un diámetro de filamento de 13-20 μm . Las propiedades mecánicas a tensión de las fibras se dan en la Tabla 3.1. En términos de durabilidad en ambientes altamente alcalinos, el trabajo de Reyes Araiza et al. (2008) muestra que la fibra basáltica tiene más resistencia a la degradación que las fibras de vidrio; por lo que, puede ser una buena alternativa como material de refuerzo en ambientes alcalinos, como el concreto húmedo o pasta de cemento Pórtland humedecida.

Adhesivo epóxico

Se utilizó adhesivo epóxico comercial marca Sika (Sikadur 31 Hi-Mod) para la fijación de las varillas en los muretes reforzados y rehabilitados. El adhesivo se eligió de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, los cuales, reportan que es utilizado en el pegado de alambres en mampostería y reparación de grietas. Las propiedades mecánicas de se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Propiedades Mecánicas: Fibras y Matriz Polimérica

Material	Resistencia a Tensión (MPa)	Módulo Elástico a Tensión (GPa)	Elongación a la Ruptura (%)	Resistencia a Flexión (MPa)	Módulo Elástico a Flexión (GPa)	Adherencia al concreto (MPa)
Matriz Polimérica	62	3.4	2.1	113	3.4	---
Fibra Basáltica	3500-4840 ^a 594 ^b	89 ^a 7.4 ^b	3.15 ^a 7.9 ^b	---	---	---
Fibra de Vidrio "E"	3100-3800 ^a 653 ^b	81 ^a 12.1 ^b	4.6 ^a 5.6 ^b	---	---	---
Adhesivo Epóxico	29.7	2.83	1.3	---	---	3.5

^a Dato del fabricante, ^b Dato obtenido en ensayo de tensión

Proceso de fabricación de las varillas

Las varillas se fabricaron por medio del método de "Pultrusión", en una máquina prototipo diseñada en el CINVESTAV-Unidad Querétaro. Se obtuvieron dos tipos de varillas con un diámetro exterior promedio de 9.0 mm y con un contenido de fibra del 49% en volumen. De acuerdo al tipo de fibra utilizado para refuerzo las varillas se clasificaron en: **VFE**, varilla reforzada con fibra de vidrio tipo E y **VFB**, varilla reforzada con fibra basáltica. En la Figura 3.1 se muestra el prototipo utilizado para la fabricación de las varillas y en la Figura 3.2 se presentan muestras de las varillas obtenida con diferente recubrimiento.



Figura 3.1 Máquina Prototipo de “Pultrusión”

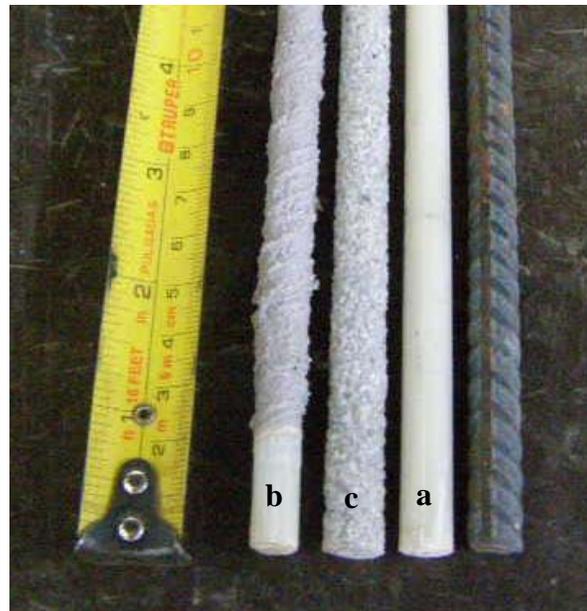


Figura 3.2 a) Varilla lisa obtenida, b) Varilla recubierta con epóxico-ceniza volante, c) Varilla recubierta con epóxico-arena sílica

3.1.2 Mortero geopolimérico

La pasta cementante de matriz polimérica inorgánica se sintetizó al mezclar metacaolín, sílice amorfa fina y una solución alcalina de hidróxido de potasio. El metacaolín utilizado tiene área superficial específica de 13.0 cm²/g y un tamaño de partícula promedio de 1.2 μm, es fabricado por BASF Corporation, Metamax. La Tabla 3.2 muestra la composición química. El metacaolín es una buena fuente de aluminosilicatos

(SiO₂ y Al₂O₃) y es altamente reactivo con activadores alcalinos (Stevenson y Sagoe-Crentsil, 2005; Duxson et al., 2005).

Tabla 3.2 Composición química del metacaolín

Material	Composición química (% en peso)									
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Metacaolin	51.6	1.61	44.8	0.5	0.04	0.13	0.05	0.2	0.16	0.06

Como solución activadora alcalina se utilizó hidróxido de potasio en combinación con agua desionizada. Se eligió utilizar hidróxido de potasio debido a que Van Deventer et al. (2007), menciona que el potasio promueve una gran reacción del metacaolín y un alto grado de incorporación del aluminio comparado con otras mezclas de álcalis (sodio y potasio, 1:1). El mortero geopolimérico se obtuvo al mezclar el agregado fino (arena de mina de Querétaro) y el cementante geopolimérico. Para el mortero geopolimérico utilizamos la arena retenida en la maya 30 (tamaño de grano, 600µm). El mortero se utilizara como matriz polimérica inorgánica para elaborar las tiras delgadas reforzadas con malla hexagonal, las cuales, servirán como refuerzo externo para mampostería de tabique.

3.1.4 Tabiques y morteros con cemento Pórtland

Piezas de tabicón

Se utilizó tabicón de concreto de forma prismática rectangular sólida, fabricado en la ciudad de Querétaro, para la construcción de los muretes. Las dimensiones nominales del tabicón son: 14 cm. de ancho, 10 cm. de alto, y 28 cm. de largo. Los tabicones son fabricados con “arenilla ligera” (de color azul grisáceo) y cemento Pórtland. Las propiedades mecánicas y físicas se verificaron de acuerdo a lo establecido en las normas ASTM C67 y NMX-C-404-ONNCCE. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 3.3, distinguiéndose, que el módulo a la ruptura de las piezas utilizadas es mayor que el permisible y que puede influir en la resistencia al agrietamiento de la mampostería.

Tabla 3.3 Propiedades físicas y mecánicas del tabicón de concreto

	Resistencia a compresión (MPa)	Módulo de Ruptura (MPa)	Absorción Promedio (%)	Absorción Inicial (gr/min)	Coefficiente de Saturación
Valores Permisibles (NMX-C-404-ONNCCE)	5.9	0.78	9-20	30	<0.8
Valores Obtenidos	6.2	1.2	12.6	24.5	0.67



Figura 3.3 a) Ensayo de módulo de ruptura en tabiques, b) Ensayo de compresión simple

Mortero para pegado de piezas en muretes de mampostería

El mortero empleado en el pegado de las piezas se fabricó con cemento Pórtland, cal hidratada y arena de mina de la región en proporción volumétrica de 2.75 veces el volumen de los cementantes, esto de acuerdo a lo establecido en la NTCM-2004. La resistencia a compresión se verificó al ensayar muestras cilíndricas de 5cm. de diámetro por 10cm. de alto, en base de lo especificado en la norma NMX-C-061-ONNCCE. La resistencia promedio obtenida fue de 108 kg/cm² (10.8 MPa.)

La arena utilizada se caracterizó de acuerdo a la norma ASTM C33-03 para obtener las propiedades de agregado fino. Las características físicas y granulométricas se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5.

Tabla 3.4 Propiedades físicas de la arena utilizada en morteros

Variable	Unidad	Valor
Desperdicios	%	7.05
Humedad	%	6.01
Peso volumétrico seco suelto	Kg/cm ³	1163.91
Peso volumétrico seco compacto	Kg/cm ³	1301.06
Granulometría	Kg	Tabla 3.4
Absorción	%	8.49
Densidad relativa	Adim.	2.61
Equivalente de arena	%	55.65
Cont. Materia orgánica	Colorimetría	M.O<3

Tabla 3.5 Datos de la granulometría de la arena utilizada en morteros.

Malla número	Peso retenido parcial %	Retenido parcial %	Retenido acumulado %	que pasa
16	0.49	0.12	0	100
20	71.04	18.10	18	82
30	104.06	26.52	45	56
50	78.15	19.92	65	36
60	65.71	16.75	81	19
100	45.04	11.48	93	8
200	30.01	7.65	101	
Suma	394.50	100.00		
Charola	3.42			
Suma	397.92			



Figura 3.4 Ensayo de compresión simple en mortero con cemento Pórtland

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Propiedades mecánica de las varillas FRP

Ensayo a tensión de las varillas FRP

Se utilizó una máquina universal con capacidad de 100KN para efectuar las pruebas de tensión, en base de la norma ASTM D3916. La longitud total de las varillas ensayadas fue de 0.60 m., considerando un espacio libre entre mordazas de 0.40 m. Para prevenir fallas prematuras y el deslizamiento de la varilla en las zonas de sujeción (mordazas de la máquina universal), se utilizaron adaptadores bi-partidos de aluminio; los cuales, se maquinaron por una cara conforme a la geometría circular de la varilla. Para evitar el deslizamiento de la varilla los adaptadores se sanblastearon para inducirle rugosidad en la zona circular de sujeción.

Se optó por utilizar los adaptadores de aluminio debido a que en los primeros ensayos se produjeron fallas prematuras en la zona de sujeción de la varilla al utilizar únicamente las mordazas para ensayo de tensión de la máquina universal. Cabe mencionar que el procedimiento de la norma ASTM D638 tampoco era una opción adecuada para el

ensayo de tensión. Esto debido a que se requieren maquinar las muestras a una geometría determinada, lo cual, puede inducir daños por maquinado y por ende daños prematuros en los ensayos.

El módulo elástico y la relación de Poisson se calcularon en base de las deformaciones longitudinal y lateral medidas por medio de strain gages (resistencias eléctricas adherentes). Además, la carga y la deformación última fueron registradas antes de que la varilla se rompiera. La resistencia a la tensión fue calculada al dividir la carga máxima entre el área original de la sección transversal mínima. Los resultados de las propiedades mecánicas a tensión se dan en la Tabla 3.6 y en la Figura 3.5 se muestra la curva esfuerzo-deformación.

Tabla 3.6 Propiedades mecánicas a tensión de las varillas

Tipo de Varilla	Esfuerzo Ultimo (MPa)	Deformación Ultima (%)	Resistencia al Aplastamiento (MPa)	Módulo Elástico (GPa)	Relación de Poisson
Fibra de Vidrio (VFE)	918±46	2.69±0.1	4	35.2±2	0.285
Fibra Basáltica (VFB)	708±35	3.03±0.15	4	24.8±1	0.30

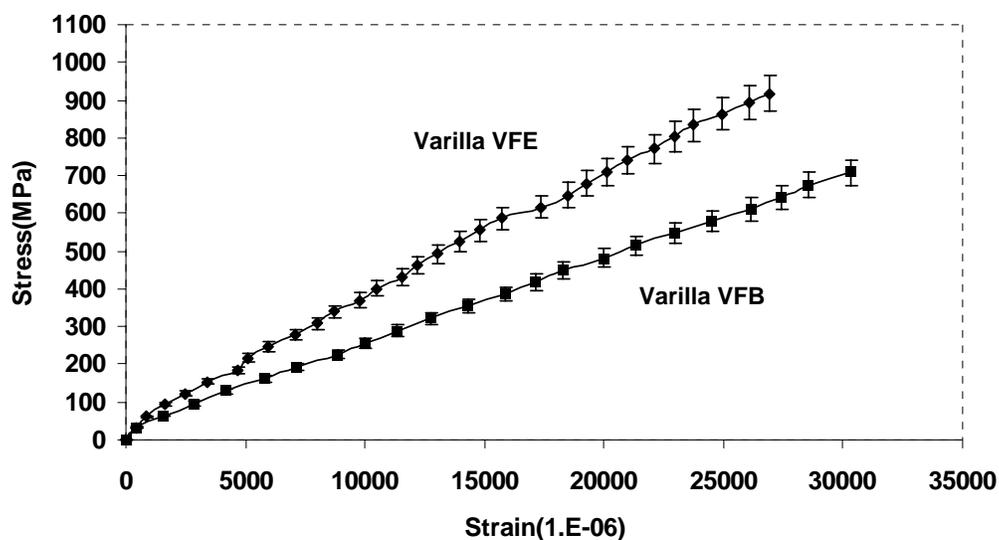


Fig. 3.5 Curva esfuerzo-deformación, ensayo a tensión de las varillas FRP

Tabla 3.7 Comparación de propiedades mecánicas a tensión de las varillas FRP y acero

	Acero	Varilla con fibra de vidrio "E"	Varilla con fibra basáltica
Esfuerzo de cedencia (MPa)	276-517	NA	NA
Resistencia a tensión (MPa)	482-689	918 ±46	707.6±35
Módulo Elástico (GPa)	200	35.2 ±2	24.8 ±1
Deformación de cedencia (%)	1.4-2.5	NA	NA
Deformación última (%)	6-12	2.7 ±0.1	3.0 ±0.15



Figura 3.6 Ensayo de tensión de varillas FRP

Ensayo a flexión de las varillas FRP

Las propiedades a flexión se evaluaron de acuerdo a la norma ASTM D790. La longitud entre apoyos de las muestras ensayadas fue de 16 veces el diámetro. Se utilizó un sistema de aplicación de carga a tres puntos, con el cual, se aplicó carga en la parte central de las varillas de polímero fibro-reforzado simplemente apoyadas. Los especímenes se flexionaron hasta la ruptura en la superficie externa a tensión. Se registró la carga, deflexiones y deformaciones en el centro de la probeta. A partir de las mediciones se calculó el esfuerzo de flexión a la ruptura y el módulo elástico a flexión con las siguientes formulas,

$$E_F = \frac{L^3 m}{12\pi r^4} \quad (3.1)$$

$$\sigma_F = \frac{PL}{\pi r^3} \quad (3.2)$$

Donde:

E_F = Modulo de elasticidad a flexión,

L = longitud entre apoyos,

m = pendiente de la tangente de la porción lineal inicial de la curva carga-deflexión,

r = radio de la varilla FRP,

σ_F = Esfuerzo de flexión a la ruptura,

P = Carga máxima soportada antes de la ruptura.

Los resultados de las propiedades mecánicas a flexión se dan en la Tabla 3.8 y en la Figura 3.7 se muestra la curva carga-deflexión.

Tabla 3.8 Propiedades mecánicas a flexión de las varillas FRP

Tipo de Varilla	Esfuerzo de Flexión a la Ruptura (MPa)	Deformación máxima a Flexión (%)	Módulo Elástico a Flexión (GPa)	Comportamiento Mecánico
Fibra de Vidrio (VFE)	698±35	2.0±0.1	36.3±2	Elástico-Frágil
Fibra Basáltica (VFB)	579±29	2.3±0.11	22.2±1.1	Elástico-Frágil

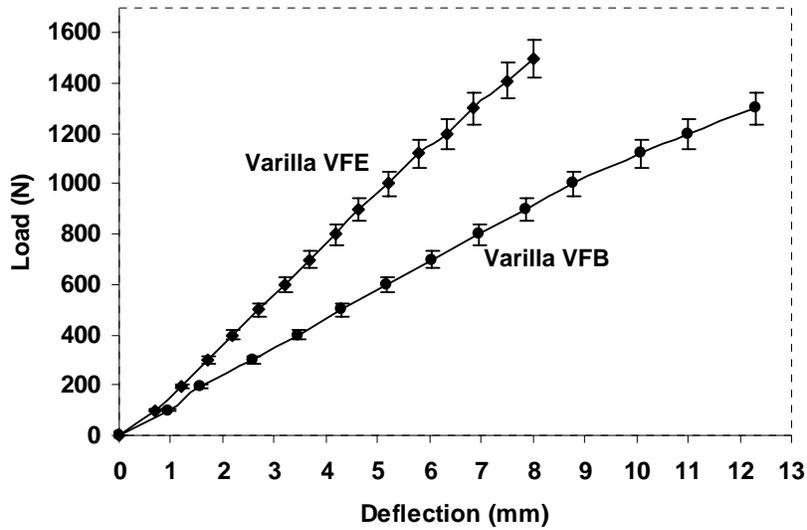


Figura 3.7 Curva carga-deflexión, ensayo a flexión de las varillas FRP

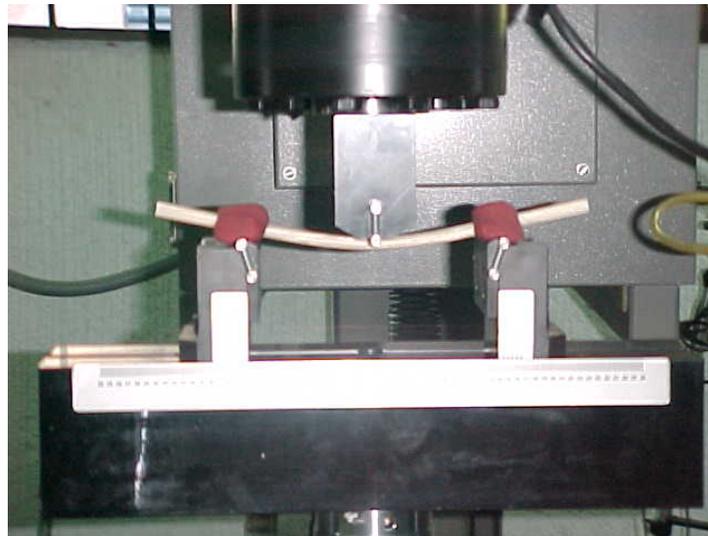


Figura 3.8 Ensayo de flexión en varillas FRP

3.2.2 Ensayo a compresión simple del mortero geopolimérico

Las propiedades mecánicas a compresión del mortero con matriz polimérica inorgánica se obtuvieron en base de muestras de cubos de 50×50×50 mm. Las muestras y el procedimiento de ensayo se efectuó de acuerdo a lo que marca la norma ASTM C109. Se utilizó una máquina universal Tinius Olsen con capacidad de 300 KN para aplicar la carga. La deformación longitudinal y transversal se registraron por medio de strain gages (galgas

extensométricas adheribles). Con tales mediciones se calculó la resistencia a compresión, el modulo elástico y la relación de Poisson. La resistencia a compresión se determinó a 3, 7, 14 y 28 días.



Figura 3.9 Ensayo de compresión simple en cubos de mortero geopolimérico

3.2.3 Ensayo de flexión de tiras de mortero geopolimérico reforzado

Para el procedimiento experimental se tomó en cuenta lo establecido en la norma ASTM C947. Se fabricaron tiras de mortero geopolimérico reforzadas con malla de alambre de tejido hexagonal con dimensión de $12 \times 50 \times 430$ mm. Por comparación de las propiedades mecánicas, también se elaboraron tiras idénticas de mortero con cemento Portland. Se procuró que la relación entre la longitud entre apoyos a espesor estuviera en el intervalo de 16 a 30, además, la longitud total de las muestras tienen 25.4 mm más de la longitud entre apoyos. Las muestras se reforzaron con dos capas de malla de alambre de diámetro pequeño de acero galvanizado con abertura hexagonal. Esto con el fin de obtener el compuesto de matriz polimérica inorgánica.

Se utilizó una máquina universal Tinius Olsen con capacidad de 300 KN para aplicar la carga. La deflexión en el centro se registró con micrómetros de carátula con precisión de 0.01 mm. Con tales mediciones se calculó la resistencia en el punto de fluencia a flexión y la resistencia última, se utilizó la siguiente ecuación,

$$F_y = \frac{3P_y L}{4bh^2} \quad (3.3)$$

Donde:

F_y = resistencia de fluencia,

P_y = fuerza aplicada correspondiente al punto sobre la curva carga-deflexión, donde, la curva se desvía de la zona lineal,

L = longitud entre apoyos,

b = ancho de la muestra,

h = espesor de la muestra.

La resistencia última se calcula con la misma fórmula, en tal caso, se considera la máxima carga aceptada por la muestra, " P_u ".

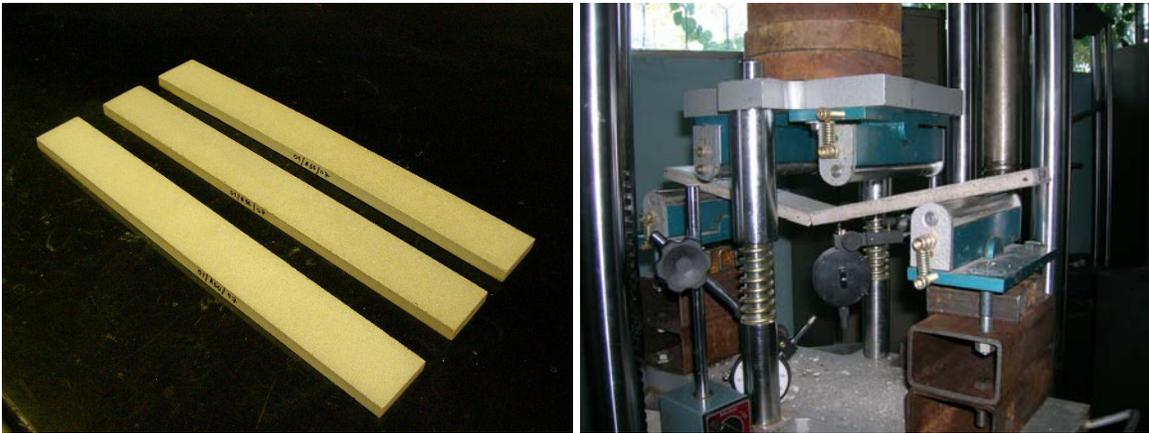


Figura 3.10 a) Tiras de mortero geopolimérico reforzado,
b) Ensayo de flexión de tiras de mortero geopolimérico

3.2.4 Pruebas de durabilidad sobre las tiras de mortero geopolimérico.

En nuestro caso, las pruebas de durabilidad se efectuaron sobre las tiras de mortero geopolimérico reforzado de 12×50×430 mm utilizadas para los ensayos de flexión. Tanto los especímenes de mortero geopolimérico como los especímenes hechos con cemento Portland, se sometieron a degradación por 5 ciclos de inmersión en solución con sulfato de magnesio y secado a alta temperatura. De acuerdo a la norma ASTM C88 y D5240, el procedimiento consiste en sumergir las muestras por 16 hrs en la solución preparada,

posteriormente las muestras se drenan por 15 min. y se secan en un horno a 110 °C. Las muestras se secan hasta que se logra un peso constante, para tal efecto, se checa la pérdida de peso en intervalos de 2 a 4 hrs. hasta que se logra una pérdida de peso del 0.1%. La pérdida de resistencia por degradación se evaluó con pruebas de flexión de acuerdo a la norma ASTM C947.

En nuestro caso se eligió utilizar sulfato de magnesio diluido en agua como solución de ataque; la solución, se preparo con 350 grs. de sulfato anhídrido disuelta en un litro de agua destilada. El procedimiento de degradación se realiza en ciclos de inmersión en solución saturada de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) o sulfato de sodio (Na_2SO_4), y secado en horno para deshidratar la sal precipitada en los poros del material. La fuerza de expansión interna, derivada de la rehidratación de la sal en la re-inmersión, simula la expansión del agua al congelarse. La prueba es usualmente más severa cuando se utiliza sulfato de magnesio.

3.2.5 Ensayo de compresión diagonal en muretes reforzados con varillas FRP.

Se construyeron diez muretes. Tres muretes no se reforzaron y siete muretes se reforzaron con la varilla de polímero fibro-reforzado; cuatro de ellos se reforzaron con varilla de fibra de vidrio tipo “E” (VFE) y tres con varilla de fibra basáltica (VFB). La construcción de los muretes se hizo de acuerdo a lo indicado en la sección 2.8.2 de las normas técnicas complementarias del distrito federal para estructuras de mampostería (NTCM-2004). Estos fueron elaborados por un albañil calificado para minimizar los defectos debido a variación en la mano de obra y manejabilidad de la mezcla de mortero. Como estudio preliminar y debido a las dimensiones del equipo para aplicación de carga, se consideró que los lados de los muretes fueran igual o mayor a 1.5 veces la máxima dimensión de las piezas utilizadas para su fabricación. Los datos de las dimensiones geométricas de todos los muretes ensayados se muestran en la Tabla 3.9.

El reforzamiento para los muretes reforzados, consistió en pegar con adhesivo epóxico, una varilla FRP a lo largo de la diagonal y sobre la superficie de una de las caras de cada murete. Esto para contrarrestar el posible agrietamiento inducido por tensión

diagonal ante carga axial de compresión. Asimismo, la zona del murete donde se pego la varilla no fue ranurada, para no inducir agrietamientos prematuros o esfuerzos residuales. Para verificar la resistencia a la degradación del adhesivo, durante 60 días después del tiempo de curado (28 días), los muretes estuvieron expuestos a un proceso de degradación a la intemperie a temperatura ambiente. Después de tal periodo se ensayaron los muretes.

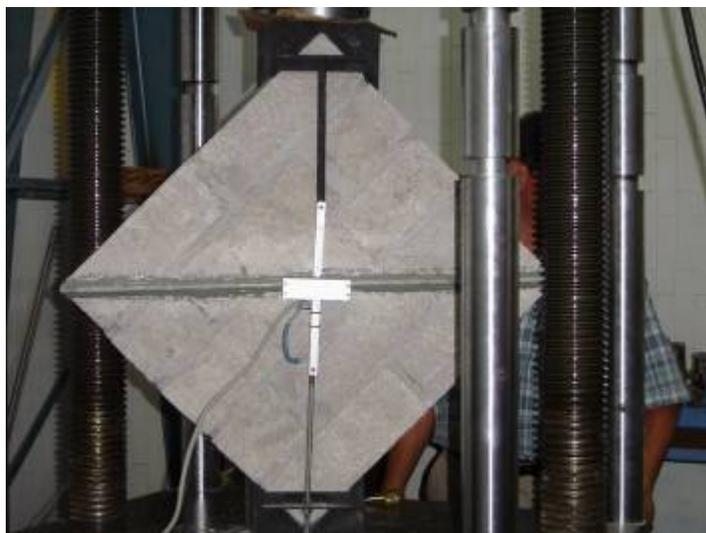


Figura 3.11 Murete reforzado con varilla de FRP

Tabla 3.9 Dimensiones geométricas de los muretes reforzados con varillas FRP

	Alto (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Diagonal (m)	Área Diagonal (m ²)
Muretes sin refuerzo					
M1-NR	0.552	0.576	0.139	0.7978	0.1109
M2-NR	0.564	0.587	0.144	0.814	0.1172
M3-NR	0.555	0.574	0.139	0.7984	0.1110
Muretes reforzados					
M4-R-VFE	0.556	0.567	0.138	0.7941	0.1096
M5-R-VFE	0.552	0.574	0.14	0.7963	0.1115
M6-R-VFE	0.553	0.572	0.138	0.7956	0.1098
M7-R-VFE	0.552	0.578	0.139	0.7992	0.1111
M8-R-VFB	0.551	0.572	0.141	0.7942	0.1120
M9-R-VFB	0.559	0.573	0.143	0.8005	0.1145
M10-R-VFB	0.552	0.576	0.144	0.7978	0.1149
Murete rehabilitado					
M11-RH	0.552	0.576	0.139	0.7978	0.1109

El programa experimental para el ensayo de los muretes se basó en la norma ASTM-E519. Se ensayaron los muretes no-reforzados (NR) enseguida los reforzados (R) y finalmente el murete rehabilitado (RH) después de ser reparado. La carga de compresión axial a lo largo de la diagonal de cada murete, se aplicó con una máquina universal con capacidad de 1.5 MN, marca “Forneys”. De acuerdo a como marca la norma, la aplicación de la carga en los muretes se efectuó por medio de apoyos fabricadas con placa de acero soldadas en “V” a 45° respecto a la horizontal, para amoldar los apoyos a las esquinas de los muretes. El arreglo experimental se muestra en la Figura 3.12.

Con carga monótona creciente (continua), se ensayaron dos muretes no-reforzados y cinco muretes reforzados. Con carga cíclica (ciclos de carga y descarga), se ensayó un murete no-reforzado y dos reforzados (en este último caso, un murete para cada tipo de varilla adherida). Uno de los muretes no-reforzados con daño severo después del ensayo, se rehabilitó; consistiendo la rehabilitación en pegar la varilla de la misma forma como se reforzaron los muretes, y sellar superficialmente con adhesivo epóxico, las grietas inducidas en el primer ensayo. El murete rehabilitado (RH) se ensayo con carga monótona creciente.



Figura 3.12 Arreglo experimental sobre la cara frontal del murete

Para cada ensayo, se registró: la carga, el acortamiento lineal de la diagonal vertical, y el alargamiento lineal de la diagonal horizontal. El acortamiento y alargamiento lineal se obtuvieron por medio de transductores con longitud calibrada de 25 cm. e instrumentados con strain gages; los cuales, se colocaron al centro de los muretes a lo largo de las diagonales. Las mediciones del acortamiento y alargamiento en muretes no-reforzados, se tomaron hasta el primer indicio del posible fallo por colapso, esto para evitar dañar los transductores. Removidos los transductores se continuó con el ensayo hasta alcanzar la carga máxima. En muretes reforzados las mediciones con los transductores se podían llevar acabo, aun, después de agrietamiento en la mampostería, esto debido a la acción del refuerzo, pero sin llegar a alcanzar la carga máxima.

En base de los valores obtenidos del alargamiento y acortamiento, para cada murete ensayado, se calculó la deformación cortante, y la relación entre el alargamiento y acortamiento lineal. El esfuerzo cortante máximo, se calculó en base de la carga máxima y del área neta de la sección transversal a lo largo de la diagonal vertical. Una vez obtenidos el esfuerzo cortante y la deformación cortante, se procedió a calcular el módulo de rigidez y, se obtuvieron las curvas esfuerzo deformación de cada ensayo. Las fórmulas utilizadas para el cálculo de las variables mencionadas anteriormente se muestran enseguida,

$$\tau_s = \frac{0.707P}{A_n} \quad (3.4)$$

Donde:

τ_s = resistencia al cortante sobre el área neta del murete,

P = carga de compresión aplicada a lo largo de la diagonal,

A_n = área neta del murete calculada de la siguiente manera:

$$A_n = \left(\frac{w + h}{2} \right) \cdot t \cdot n \quad (3.5)$$

Donde:

w = ancho del murete,

h = altura del murete,

t = espesor del murete,

n = porcentaje del área neta de la pieza de tabique que es sólida, en decimales.

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (3.6)$$

Donde:

γ = deformación al cortante,

ΔV = acortamiento vertical sobre la diagonal,

ΔH = acortamiento horizontal sobre la diagonal,

n = longitud vertical calibrada.

$$G = \frac{\tau_s}{\gamma} \quad (3.7)$$

G = módulo de rigidez.

3.2.6 Ensayo de compresión diagonal en muretes reforzados con tiras de mortero geopolimérico.

El programa experimental es similar al descrito en la sección anterior, se basa en la norma ASTM-E519. Sin embargo, el reforzamiento en este caso, consistió en pegar con adhesivo epóxico láminas de ferrocemento obtenidas con mortero geopolimérico, sobre ambas caras a lo largo de la diagonal horizontal de los muretes. Esto para contrarrestar el posible agrietamiento inducido por tensión diagonal ante carga axial de compresión por ambas caras y en la zona cercana a la aplicación de la carga.

Se construyeron doce muretes. Tres muretes sin refuerzo (muestras de referencia); tres muretes reforzados con una tira en la parte central solo por una cara (**RG1CC**); tres muretes con una tira en la parte central por las dos caras (**RG2CC**); y tres muretes reforzados por una cara en tres zonas del murete (**RG1CE**); diagonal horizontal, y sobre las

zonas cercas de la aplicación de la carga. Ver Figura 3.13 y Tabla 3.10 para las dimensiones.

Tabla 3.10 Dimensiones geométricas de los muretes reforzados con geopolímero

	Alto (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	Diagonal (m)	Área Diagonal (m ²)
Muretes sin refuerzo					
M1-NR	0.576	0.540	0.139	0.789	0.110
M2-NR	0.574	0.533	0.144	0.783	0.113
M3-NR	0.566	0.529	0.139	0.775	0.108
Murete reforzado con una tira en las dos caras					
M4-RG2CC	0.569	0.532	0.138	0.779	0.108
M5-RG2CC	0.567	0.531	0.140	0.777	0.110
M6-RG2CC	0.572	0.542	0.138	0.788	0.109
Murete reforzado con una tira en una cara					
M7-RG1CC	0.575	0.533	0.139	0.784	0.109
M8-RG1CC	0.575	0.531	0.141	0.782	0.110
M9-RG1CC	0.574	0.529	0.143	0.780	0.112
Murete reforzado con tres tira en una cara					
M10-RG1CE	0.577	0.532	0.144	0.785	0.113
M11-RG1CE	0.573	0.522	0.140	0.788	0.110
M12-RG1CE	0.575	0.529	0.140	0.781	0.109



Figura 3.13 Murete reforzado con tiras de mortero geopolimérico reforzado
a) Murete reforzado RG1CC o RG2CC, b) Murete reforzado RG1CE

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan y discuten los resultados relacionados con las propuestas de reforzamiento para mampostería de tabique reforzada con las varillas FRP y tiras delgadas de mortero geopolimérico reforzado.

4.1 Propiedades mecánicas del mortero y tiras del mortero geopolimérico

En las Figura 4.1 se muestra las tiras de mortero geopolimérico reforzado en base del mortero con matriz polimérica inorgánica. Estos laminados se obtuvieron para valorar las propiedades mecánicas a flexión como material de refuerzo para mampostería de tabique. Además, se valoro su durabilidad bajo un proceso de degradación con sulfato de magnesio, tales resultados también se compararon con muestras de cemento Pórtlan. El comportamiento a flexión con y sin degradación se puede apreciar en las Figura 4.3, 4.4, y 4.5. Además, en la Tabla 4.2 se resumen los resultados cuantitativos de tal comportamiento.

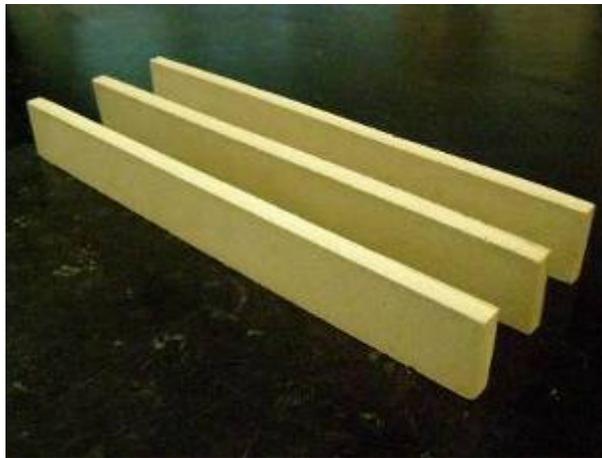


Figura 4.1 Tiras de mortero geopolimérico.

En la Figura 4.2 se muestra el diseño experimental para los ensayos a compresión y flexión y en la Tabla 4.1 se resumen los resultados de la resistencia a compresión obtenidas. Respecto a los resultados a compresión, se observa que el mortero geopolimérico tiene mas resistencia a la compresión que los morteros tipo II hechos con cemento Pórtland, inclusive se obtiene mayor resistencia desde los 7 días de curado.



Figura 4.2 Ensayo a compresión y flexión de morteros geopoliméricos

Tabla 4.1 Resistencia a compresión de mortero geopolimérico.

Ensayo a compresión mortero geopolimérico	
Edad	Resistencia (MPa)
7 días	8.9
14 días	9.1
28 días	10.1
90 días	10.4
CP, 28 días	8.1

Los resultados de los ensayos a flexión evidencian que los laminados con matriz polimérica inorgánica tienen resistencia similar a los elaborados con cemento Pórtland. Esto se observa al comparar el esfuerzo de cedencia y el último de ambos materiales. En relación a la degradación por sulfatos de ambos materiales, se observa que los laminados de mortero geopolimérico presentan mayor resistencia mecánica que las de los laminados hechos con cemento Pórtland. Tal característica se evidencia en la gráfica de la Figura 4.5.

Tabla 4.2 Resistencia a la flexión laminados con mortero geopolimérico.

	Esfuerzo de cedencia (MPa)	Esfuerzo último (MPa)	Carga última (N)	Deflexión a la cedencia (mm)	Deflexión última (mm)
Mortero geopolimérico reforzado: sin ataque					
MGPRSA	4.43	39.3	862	1	30.6
Mortero cemento Pórtland reforzado: sin ataque					
MCPRSA	4.35	36.7	804.4	2	32.5
Mortero geopolimérico reforzado: Ataque con sulfato magnesio					
MGPRSM	4.51	34.3	638	1.26	27.4
Mortero cemento Pórtland reforzado: Ataque con sulfato de magnesio					
MCPRSM	4.48	22.4	490.5	1.87	29.5

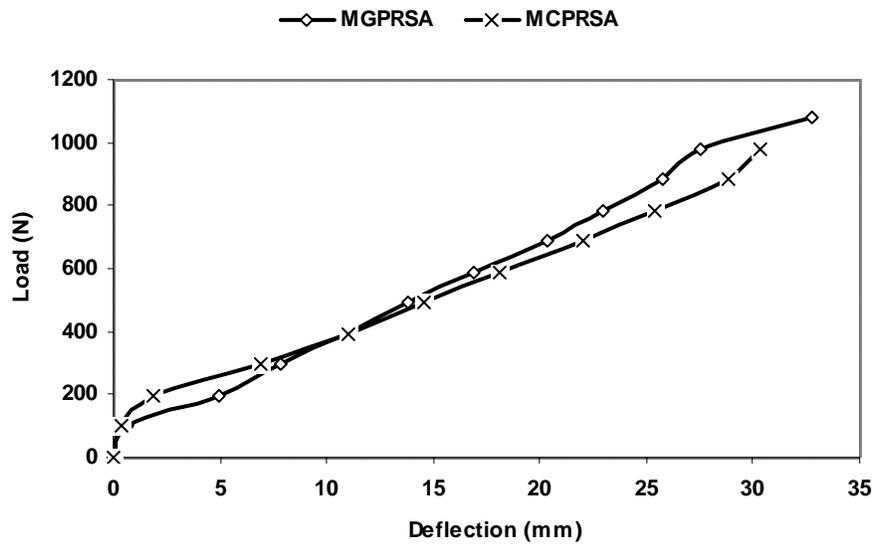


Figura 4.3 Curva carga-deflexión laminados reforzados sin ataque

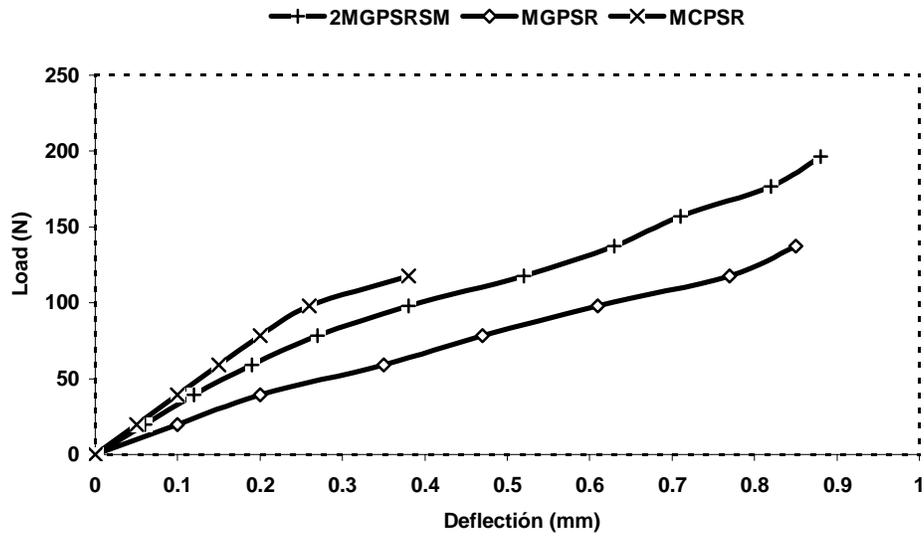


Figura 4.4 Curva carga-deflexión laminados sin refuerzo sin ataque

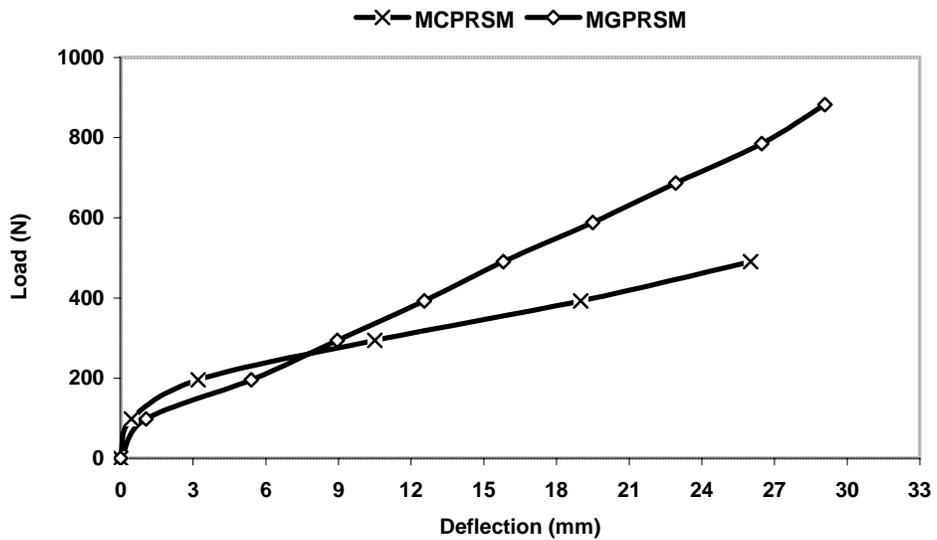


Figura 4.5 Curva carga-deflexión laminados reforzados: ataque con sulfato de magnesio.

4.2 Mampostería reforzada con varillas FRP.

Los resultados de las pruebas sobre muretes no-reforzados (NR), reforzados (R), y rehabilitados (RH), son presentados en la Tabla 4.3; la cual incluye: la carga de agrietamiento, acortamiento y alargamiento lineal sobre sus diagonales, esfuerzo y deformación cortante, modulo de rigidez, y la relación propuesta entre la deformación por alargamiento y el acortamiento lineal en similitud con la relación de Poisson. Las curvas esfuerzo-deformación de cortante, ante carga monótona (con carga continua) y ciclos de carga-descarga se muestran en las Figuras 4.6-4.9.

Tabla 4.3 Resumen de resultados de pruebas en muretes reforzados con varillas FRP

	Forma de Carga	Carga de Agrietamiento (kg)	Acortamiento Vertical (mm)	Alargamiento Horizontal (mm)	Deformación Cortante	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	Relación D.Acor./D.Alar.	Módulo de Rigidez (Kg/cm ²)
Muretes sin refuerzo								
M1-NR	Continua	8400	7.94	0.072	0.009	7.58	0.009	842.2
M2-NR	Continua	10200	7.43	0.055	0.009	8.70	0.0073	966.7
M3-NR	Cíclica	7800	6.42	0.047	0.0081	7.03	0.0073	864.2
Muretes reforzados								
M4-R-VFB	Continua	13000	4.95	0.014	0.006	11.86	0.003	1976.7
M5-R-VFB	Continua	12000	5.04	0.008	0.006	10.76	0.002	1793.0
M6-R-VFB	Cíclica	10000	5.08	0.055	0.006	9.11	0.010	1518.3
M7-R-VFE	Continua	9800	3.98	0.055	0.005	8.82	0.013	1764.0
M8-R-VFE	Cíclica	10200	3.83	0.17	0.005	9.10	0.044	1820.0
M9-R-VFE	Continua	10800	1.76	0.032	0.002	9.43	0.020	4715.0
M10-R-VFE	Continua	17000	4.71	0.013	0.006	14.80	0.003	2467.0
Murete rehabilitado								
M11-RH	Continua	8600	4.30	3.13	0.009	7.76	0.72	862.20

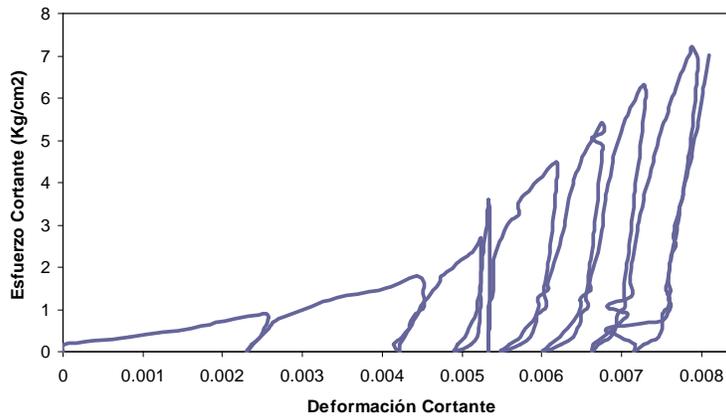
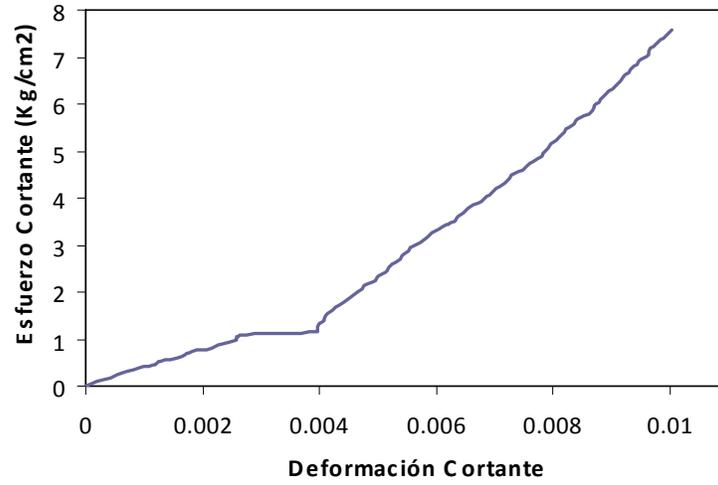


Fig. 4.6 Gráfica esfuerzo-deformación murete no-reforzado (NR):
a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga

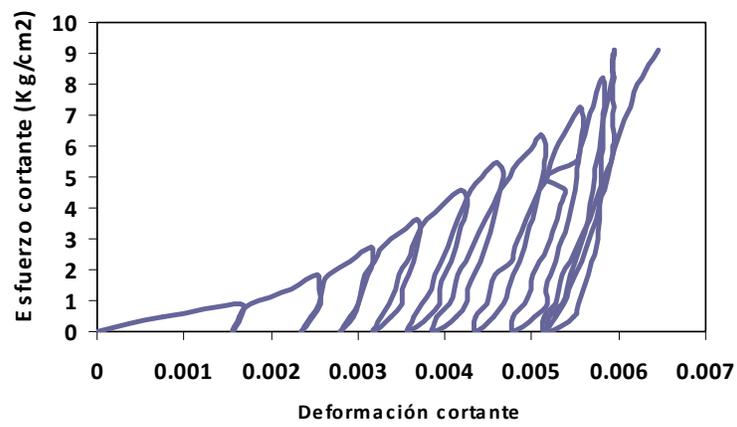
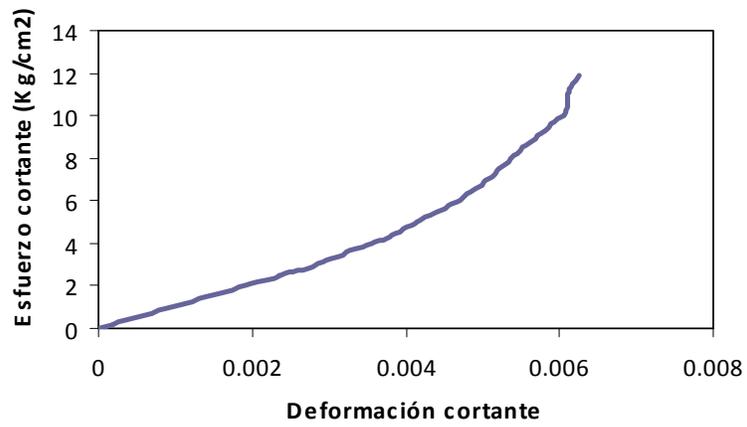


Fig. 4.7 Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado (R-VFB) con varilla VFB:
a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga

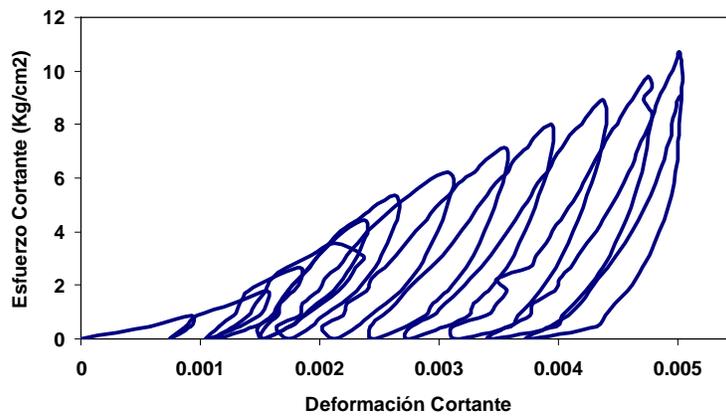
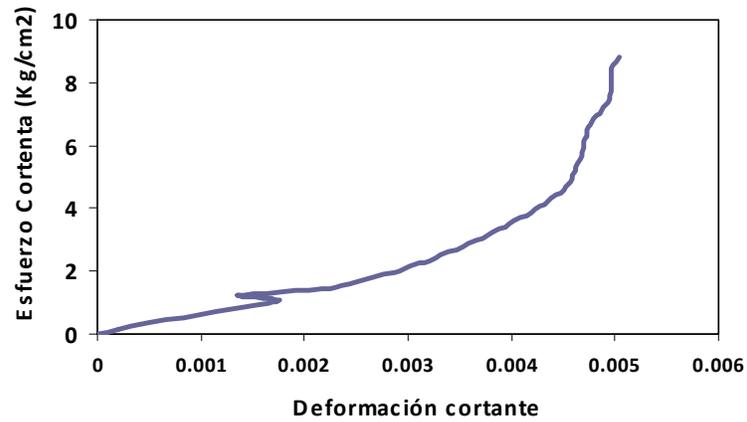


Fig. 4.8 Gráfica esfuerzo-deformación muro reforzado (R-VFE) con varilla VFE:
 a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga

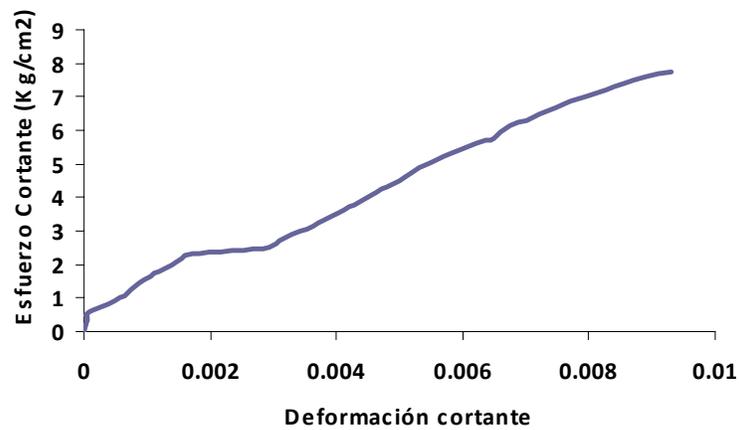


Fig. 4.9 Gráfica esfuerzo-deformación muro rehabilitado (RH) con varilla VFE

4.2.1 Efecto del refuerzo sobre la resistencia a cortante de los muretes

Los resultados muestran que la resistencia promedio de los muretes reforzados, es mayor a los no reforzados. Además, la carga de agrietamiento soportada por los muretes en ensayos ante carga monótona (con aplicación continua), es mayor que la carga del último ciclo de carga en los ensayos con carga cíclica.

Con carga continua, los muretes reforzados con la varilla VFE, incrementan su resistencia al cortante en un 35.4 % respecto a los muretes no-reforzados; y los muretes reforzados con la varilla VFB, incrementan la resistencia en un 39% respecto a los muretes no-reforzados. Ante carga cíclica de carga-descarga, los muretes reforzados con la varilla VFE, incrementan su resistencia en un 29.4 % respecto a los muretes no-reforzados; y los muretes reforzados con la varilla VFB, incrementan la resistencia en un 29.6 % respecto a los muretes no-reforzados. La diferencia entre los porcentajes de la resistencia para los muretes reforzados con varillas VFE y los reforzados con varillas VFB, con carga continua, es de 3.6 %; y con carga cíclica la diferencia es de 0.2 %.

El murete rehabilitado recupero su resistencia en un 95.3 % respecto a la resistencia promedio de los muretes no-reforzados; sin embargo, considerando el menor valor obtenido para la resistencia a cortante de los muretes no-reforzados (7.58 kg/cm²), se puede observar que la resistencia se incrementa en un 3 % (7.76 kg/cm²). Los resultados anteriores, evidencian que el comportamiento de los muretes reforzados con las diferentes varillas, es muy parecido; logrando incrementar el esfuerzo cortante promedio.

4.2.2 Efecto del refuerzo sobre el alargamiento horizontal y acortamiento vertical.

Como podemos ver en la Tabla 4.3, el acortamiento vertical promedio para los muretes, es mucho mayor al alargamiento horizontal; esto debido, a que se presenta en la dirección de aplicación de la carga. El acortamiento vertical promedio con carga continua en muretes no-reforzados, fue de 7.7 mm.; mientras que en los muretes reforzados con las varillas VFB fue de 5.0 mm., y en los muretes reforzados con la varilla VFE fue de 3.5 mm. Se puede observar, que el sistema de reforzamiento, contribuye en reducir tal acortamiento sobre todo cuando se utiliza varilla VFE como refuerzo. Para los muretes ensayados con

carga cíclica, se puede observar, que el acortamiento vertical también se reduce en los muretes reforzados con las varillas de polímero fibro- reforzado. De igual manera, en el murete rehabilitado se observa también una disminución del acortamiento vertical, respecto al acortamiento del murete no-reforzado.

La reducción del alargamiento horizontal, en muretes reforzados (respecto a los no-reforzados), confirman el objetivo principal de la colocación de la varilla de refuerzo. Los resultados muestran que se restringió el agrietamiento, y por ende, el reforzamiento contribuyó a la estabilidad de la mampostería después del agrietamiento. En resumen, el valor promedio del alargamiento horizontal en muretes no-reforzados fue de 0.06 mm.; mientras que el valor promedio en muretes reforzados con varilla VFB fue de 0.011 mm., y con varilla VFE fue de 0.033. El alargamiento horizontal para el murete rehabilitado fue de 3.13 mm., tal alargamiento fue lo suficientemente grande para inducirle el agrietamiento, en la reparación superficial con adhesivo epóxico de la grieta inducida en el primer ensayo; lo cual, se presume iba a suceder, ver Figura 4.12.

Tratando de cuantificar y comparar, los agrietamientos inducidos sobre la cara no-reforzada, de los muretes no-reforzados, reforzados, y el rehabilitado; se calculó la longitud y el área del agrietamiento, en base un procesamiento de imágenes de fotografías tomadas a algunos muretes ensayados, ver Figura 4.10, 4.11 y 4.12. Para los muretes no-reforzados, el área del agrietamiento fue de 1071 mm² y la longitud de 733 mm., y para los muretes reforzados el área fue de 474 mm² y la longitud de 625 mm. Para el murete rehabilitado, el área del agrietamiento fue de 3594 mm² y la longitud de 953 mm.; lo cual, concuerda con el gran alargamiento horizontal y por ende con el agrietamiento inducido, ver Figura 4.12. Con tales datos, se corroboró que el refuerzo propuesto, contribuye a aumentar la resistencia de la mampostería y por ende a evitar el agrietamiento.

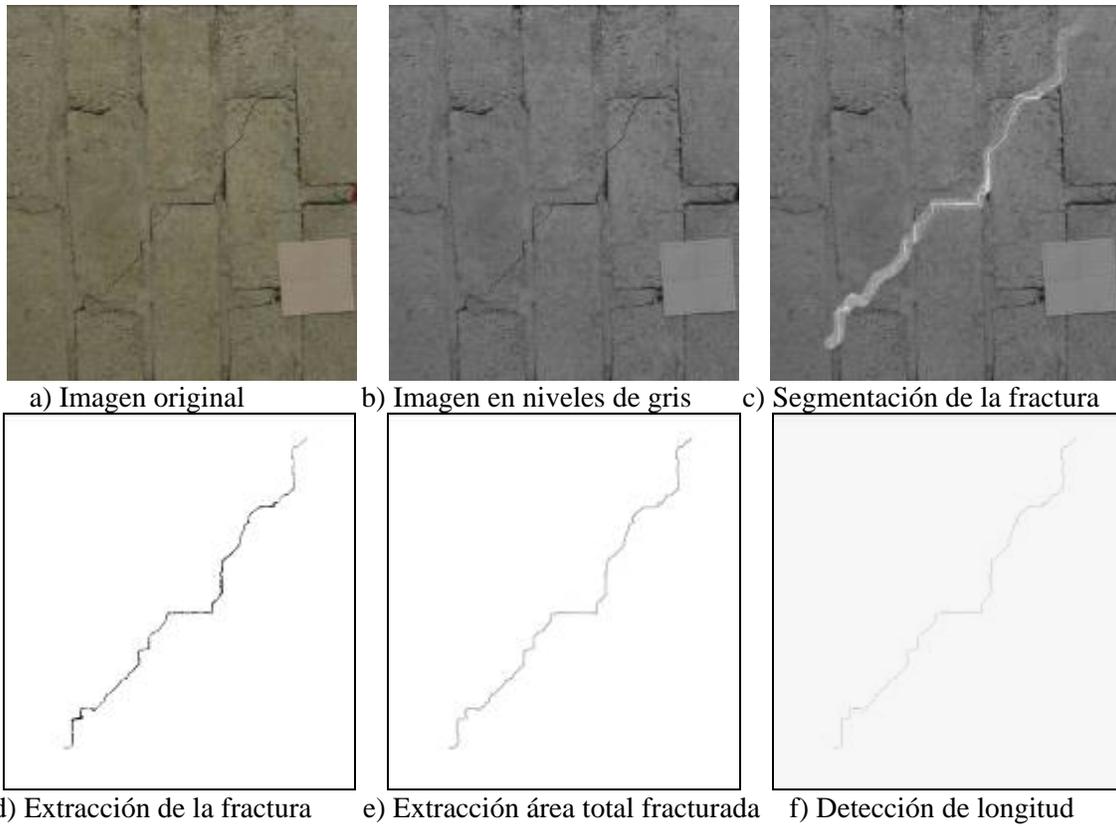
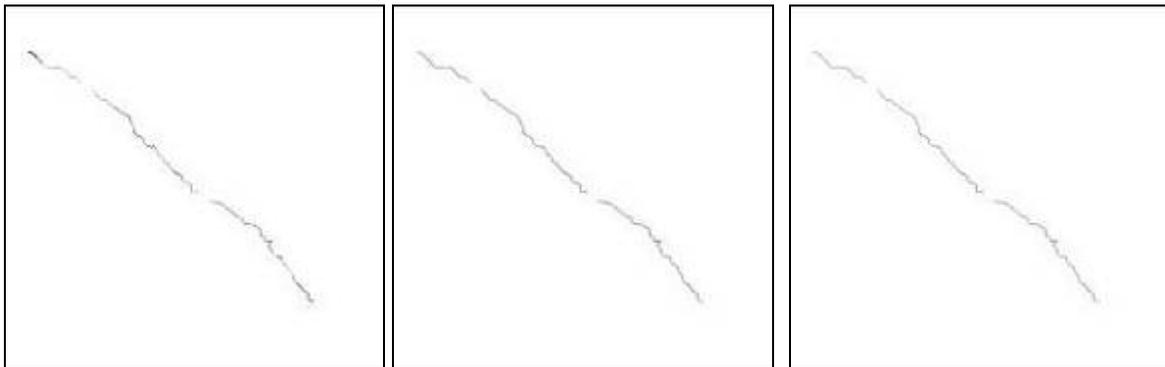


Fig. 4.10 Imágenes para medición en murete ensayado: no-reforzado (NR)



a) Imagen original b) Imagen en niveles de gris c) Segmentación de la fractura



d) Extracción de la fractura e) Extracción área total fracturada f) Detección de longitud

Fig. 4.11 Imágenes para medición en murete ensayado: reforzado (R), cara no-reforzada

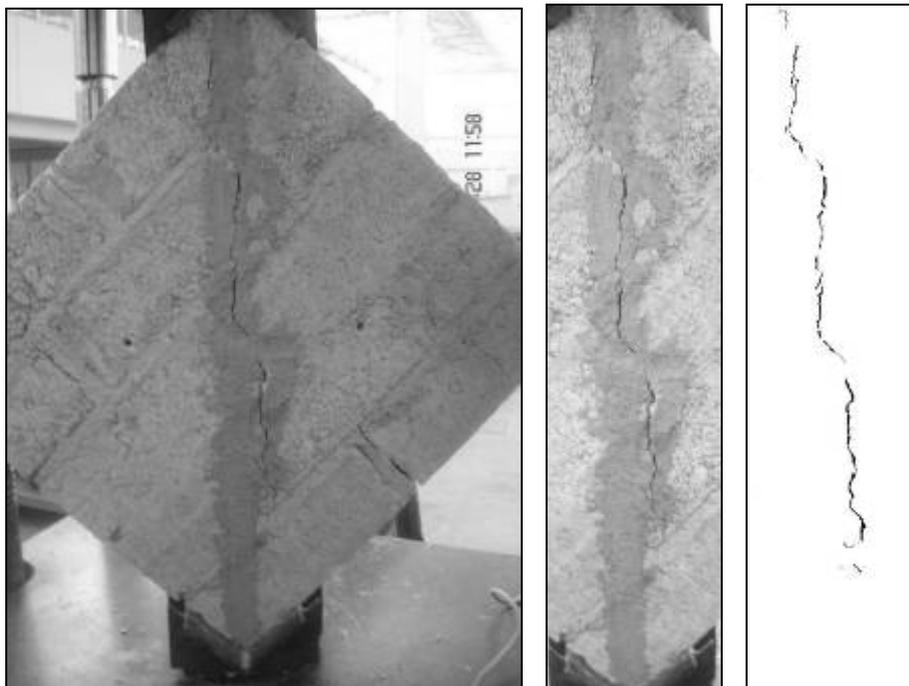


Fig. 4.12 Imágenes para medición en murete ensayado: rehabilitado (RH); cara no-reforzada.

4.2.3 Efecto del refuerzo sobre la rigidez de los muretes

En relación a los valores obtenidos del módulo de rigidez, los resultados muestran que la rigidez promedio en los muretes reforzados, es mucho mayor a los no-reforzados. Con carga continua, en los muretes reforzados con la varilla VFE, se obtuvo un incremento en el módulo de rigidez de un 230 % respecto a los muretes no-reforzados; y en los muretes reforzados con la varilla VFB, se obtuvo un incrementan de un 108% respecto a los muretes no-reforzados. La diferencia entre los porcentajes de la rigidez para los muretes reforzados con varillas VFE, y los reforzados con varillas VFB, ante carga continua, es del 122 %. El gran incremento de la rigidez promedio en los muretes reforzados con las varillas VFE, se debió al alto valor obtenido en el murete número 9 (4715 kg./cm²); al no considerar este valor en el promedio, el incremento en el módulo de rigidez es del 134 %.

Con carga cíclica de carga-descarga, el módulo de rigidez para los muretes reforzados con la varilla VFE, se incremento en un 110 % respecto a los muretes no-reforzados; y el módulo de rigidez para los muretes reforzados con la varilla VFB, se incremento en un 76 % respecto a los muretes no-reforzados. La diferencia entre los porcentajes de la rigidez para los muretes reforzados con varillas VFE, y los reforzados con varillas VFB, ante carga cíclica, es del 34 %. En relación al murete rehabilitado, se recupero el 95.3 % del módulo de rigidez promedio respecto a los muretes no-reforzados. Sin embargo, considerando el menor valor obtenido para el módulo de rigidez de los muretes no-reforzados (842.2 kg/cm²), se puede observar que el módulo se incremento en un 2 % (862.2 kg/cm²).

De acuerdo a los resultados obtenidos, la rigidez obtenida en los muretes reforzados, refleja significativamente el propósito del reforzamiento propuesto (refuerzo-adhesivo). Sin embargo, el incremento de la rigidez debe ser atribuida principalmente a la varilla de refuerzo. Esto se concluye, debido a que como se observa en la Figura 4.12 correspondiente al murete rehabilitado; el mayor agrietamiento se presenta en la cara no reforzada, precisamente sobre el resane superficial con adhesivo epóxico de la grieta inducida en el primer ensayo, es decir, la rigidez de la varilla es superior a la del epóxico. Además, se puede deducir que el esfuerzo de tensión inducido en la varilla de refuerzo, no es lo

suficientemente grande para hacer que la varilla trabaje al límite de su capacidad. Esto debido a que las varillas no se dañaron, y la falla común observada después de sobrecargar a los muretes (después del agrietamiento) se presenta por desprendimiento del adhesivo sobre la mampostería.

4.3 Mampostería reforzada con tiras de mortero geopolimérico reforzado con malla

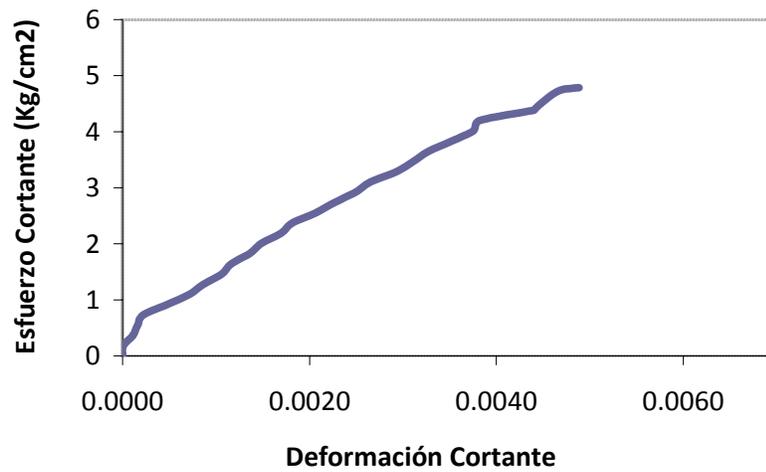
Se presenta en la Tabla 4.4, el comportamiento de muretes no-reforzados (NR), reforzados (R), ante tensión diagonal (cortante) inducido por cargas de compresión aplicada sobre una diagonal de los muretes. Se incluye, la carga de agrietamiento, acortamiento y alargamiento lineal sobre sus diagonales, esfuerzo y deformación cortante, y módulo de rigidez. Para efecto de la experimentación, se construyeron doce muretes: tres muretes no reforzados (muestras de referencia); tres muretes, reforzados sobre la diagonal por solo una cara (RG1CC); tres muretes, reforzados en la diagonal horizontal por las dos caras (RG2CC); tres muretes, reforzados por una cara en la diagonal horizontal y sobre las zonas cercas a la aplicación de la carga (RG1CE). Las curvas esfuerzo-deformación cortante ante carga continua y cíclica se muestran en las Figuras 4.14-4.17.

Tabla 4.4 Resumen de resultados de muretes reforzados con geopolímero

	Forma de Carga	Carga de Agrietamiento (kg)	Acortamiento Vertical (mm)	Alargamiento Horizontal (mm)	Deformación Cortante	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	Módulo de Rigidez (Kg/cm ²)
M1-NR	Continua	5250	3.85	0.07	0.005	4.8	960
M2-NR	Cíclica	4400	1.5	0.04	0.004	3.9	975
M3-NR	Continua	5000	1.8	0.01	0.004	4.64	1160
M4-RG2CC	Continua	7600	3.85	0.01	0.0031	7.08	2360
M5-RG2CC	Cíclica	5800	5.94	0.01	0.003	5.15	1717
M6-RG2CC	Continua	7200	3.13	0.005	0.003	6.6	2300
M7-RG1CC	Continua	8000	1.5	0.02	0.003	7.34	2447
M8-RG1CC	Continua	7800	2.52	0.03	0.003	7.07	2357
M9-RG1CC	Cíclica	6800	1.43	0.02	0.0031	6.10	1968
M10-RG1CE	Cíclica	7600	2.6	0.01	0.003	6.78	2360
M11-RG1CE	Continua	9250	3.75	0.01	0.003	8.38	2793
M12-RG1CE	Continua	7050	3.62	0.01	0.003	6.50	2167



Figura 4.13 Murete ensayado reforzado con geopolimérico (RG1CE)



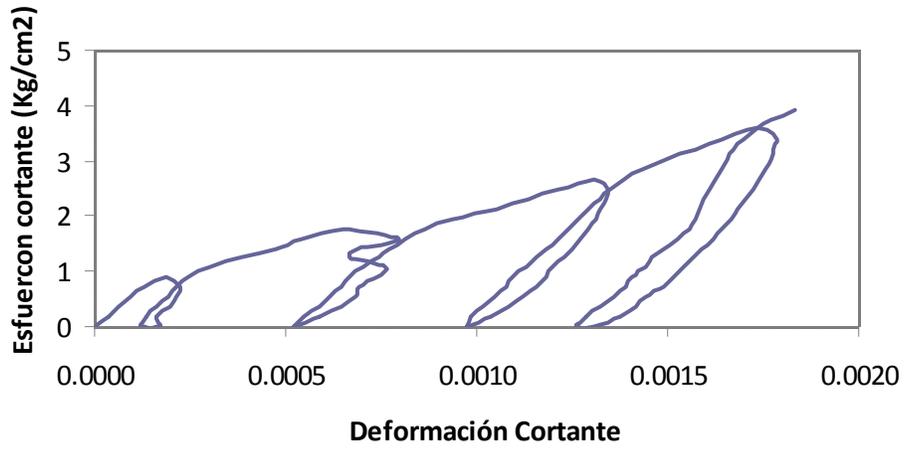
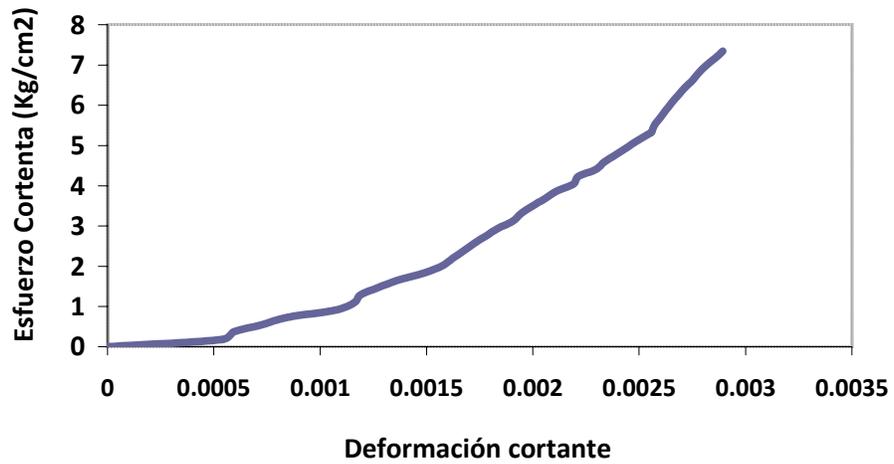


Figura 4.14 Gráfica esfuerzo-deformación murete no-reforzado: (referencia para geopolímero) a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga



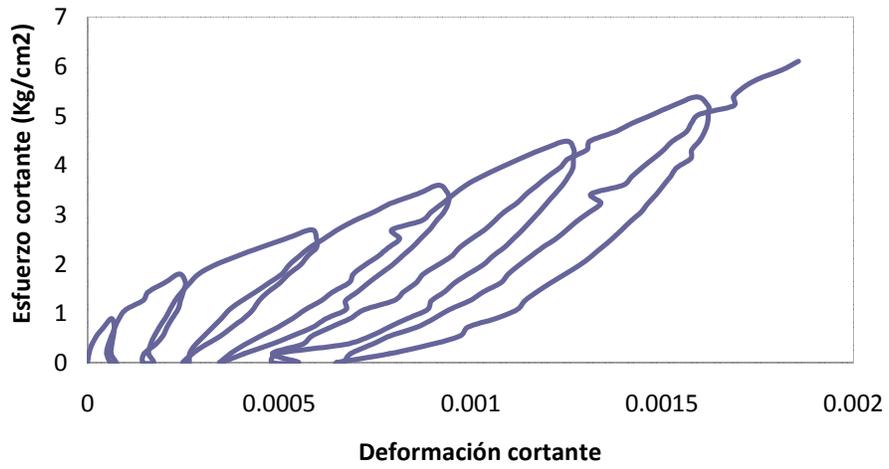
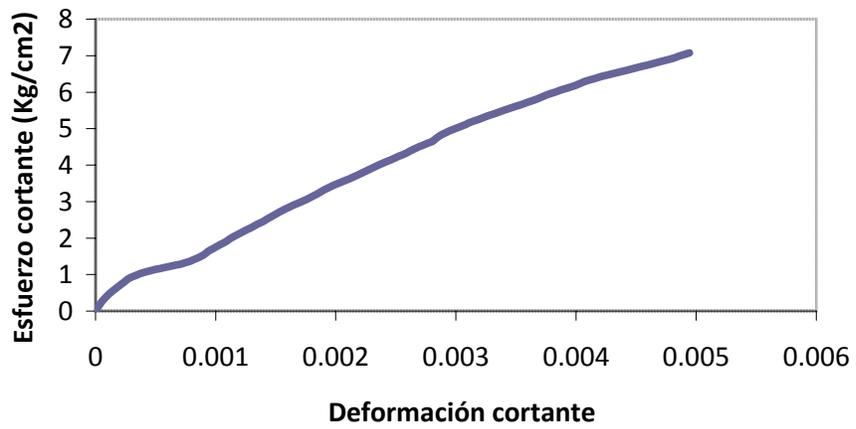


Figura 4.15 Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado con geopolímero (RG1CC):
 a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga



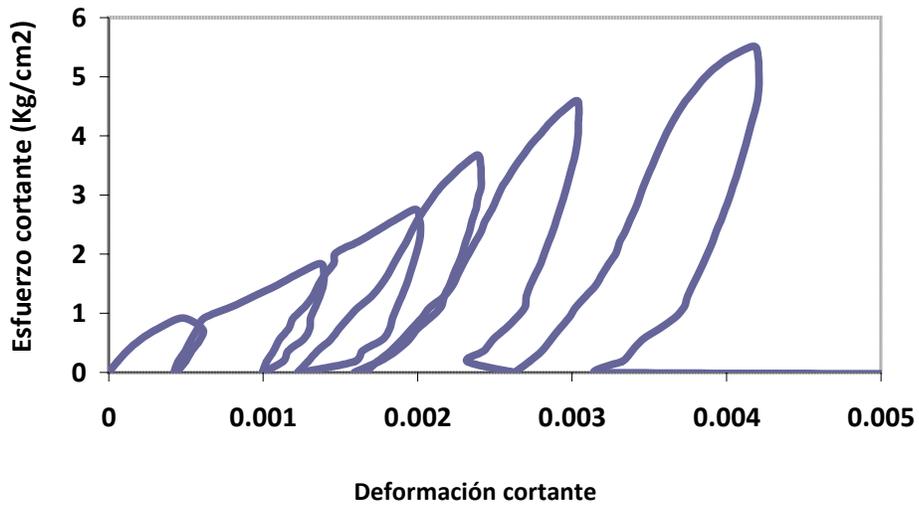
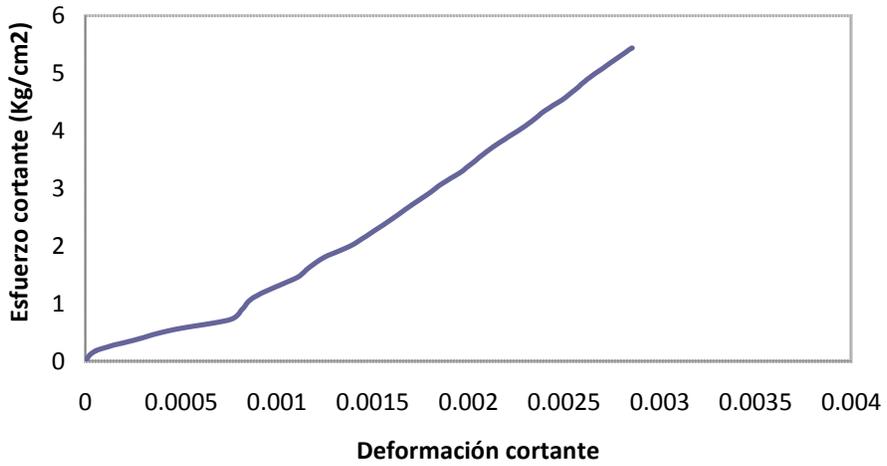


Figura 4.16 Gráfica esfuerzo-deformación muro reforzado con geopolímero (RG2CC):
a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga



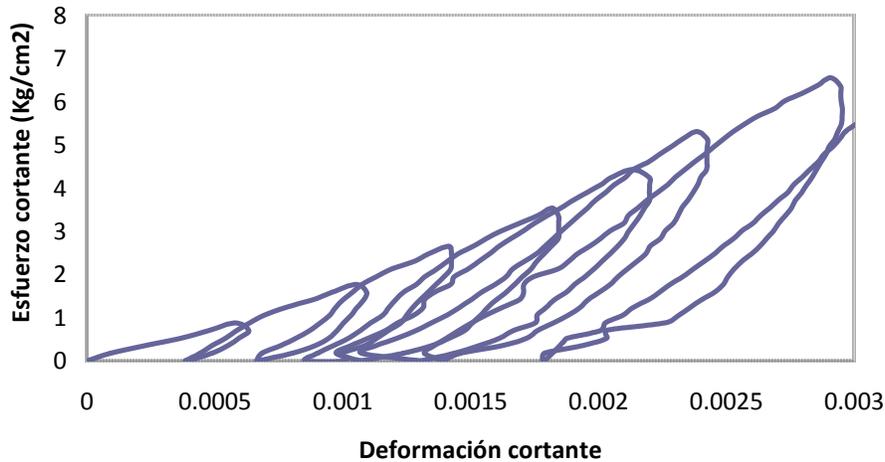


Figura 4.17 Gráfica esfuerzo-deformación murete reforzado con geopolímero (RG1CE):
a) Carga continua, b) Ciclos Carga-descarga

4.3.1 Resistencia a cortante de muretes reforzados con ferro-cemento geopolimérico

Los resultados muestran que la resistencia de los muretes reforzados ante carga continua y cíclica es mayor a la de los no-reforzados. Además, tanto para muretes no-reforzados, como para los reforzados, la resistencia ante carga continua es mayor a la de carga cíclica. Respecto a la falla o agrietamiento presentado en los muretes reforzados, se observa que el reforzamiento se adhirió adecuadamente y trabaja en conjunto con las piezas de mampostería, esto debido a que el agrietamiento por cortante se transfirió al material de refuerzo. Sin embargo, si las tiras de ferro-cemento tuvieran mayor resistencia al cortante, los muretes reforzados incrementarían su resistencia.

Con carga continua, los muretes reforzados RG2CC, RG1CC, RG1CE, incrementaron su resistencia al cortante en un 45 %, 55%, y 58% respecto a los muretes no-reforzados, respectivamente. Ante carga cíclica, los muretes reforzados RG2CC, RG1CC, RG1CE, incrementaron su resistencia respecto a los muretes no-reforzados en 32%, 56%, y 73% respectivamente. Además, los resultados evidencian que los muretes reforzados RG1CE son más resistentes que los otros dos tipos de muretes reforzados. Se concluye, que

el reforzar en tres zonas con tiras de ferro-cemento geopolímero es más eficiente que reforzar solo en el centro.

4.3.2 Efecto del refuerzo sobre el alargamiento horizontal y acortamiento vertical.

Como podemos ver en la Tabla 4.12, el acortamiento vertical promedio para los muretes es mucho mayor al alargamiento horizontal; esto debido, a que se presenta en la dirección de aplicación de la carga. En general, el alargamiento horizontal en muretes reforzados es menor al de los no-reforzados. Este efecto es inducido por la restricción a la deformación del murete sobre la diagonal horizontal impuesta por los laminados de ferro-cemento geopolimérico adheridos. Además, el reforzamiento contribuyó a la estabilidad de la mampostería después del agrietamiento. En resumen, el valor promedio del alargamiento horizontal en muretes no-reforzados fue de 0.04 mm., mientras que para los muretes reforzados RG2CC, RG1CC, y RG1CE fue de 0.01, 0.02, y 0.01 mm., respectivamente.

4.6.3 Efecto del refuerzo sobre la rigidez de los muretes.

En relación a los valores obtenidos del módulo de rigidez, los resultados muestran que la rigidez promedio en los muretes reforzados, es mucho mayor a los no-reforzados. Con carga continua, los muretes reforzados RG2CC, RG1CC, RG1CE, incrementaron su rigidez al cortante en un 120 %, 127%, y 134% respecto a los muretes no-reforzados, respectivamente. Ante carga cíclica, los muretes reforzados RG2CC, RG1CC, RG1CE, incrementaron su rigidez respecto a los muretes no-reforzados en 76%, 102%, y 142% respectivamente.

Se observa que los muretes reforzados RG1CE muestran más rigidez que los otros dos tipos de muretes reforzados. Se concluye, que el reforzar en tres zonas con tiras de ferro-cemento geopolímero es más eficiente que reforzar solo en el centro. De acuerdo a los resultados obtenidos, la rigidez obtenida en los muretes reforzados, refleja significativamente el propósito del reforzamiento propuesto (refuerzo-adhesivo); sin embargo, el incremento de la rigidez debe ser atribuida principalmente a las laminas de ferro-cemento geopolimérico.

5. Conclusiones

⊕ De acuerdo a los resultados de la evaluación estructural de la mampostería reforzada con las varillas FRP y tiras de mortero geopolimérico reforzado, se concluye que pueden ser una alternativa viable para el reforzamiento y rehabilitación de mampostería de tabique. Esto debido a que contribuyen al aumento de la resistencia al cortante y rigidez en muretes de mampostería de tabique.

⊕ Utilizando las varillas FRP la resistencia se incrementa en un 50%, mientras que la rigidez se incrementa desde un 100 hasta el 200%. Para, la mampostería reforzada con mortero geopolimérico, la resistencia se incrementa desde un 45 hasta 60%, mientras que la rigidez se incrementa desde un 120 hasta el 140%. El murete rehabilitado alcanzo a recuperar el 95% de la resistencia original promedio respecto a los muretes sin refuerzo.

⊕ Los morteros geopoliméricos son materiales novedosos y pueden ser una buena alternativa para sustituir al mortero con cemento Pórtland en la industria de la construcción. De acuerdo a lo mostrado al caracterizarlos mecánicamente se obtuvieron resistencias similares tanto a compresión como a flexión, por lo que pueden ser una buena alternativa para reforzar elementos estructurales.

Trabajos futuros

- ⊕ Manejo de materiales reciclables para los materiales compuestos con matriz orgánica e inorgánica.
- ⊕ Análisis del comportamiento de mampostería de tamaño natural reforzados con varillas FRP.
- ⊕ Análisis de la contribución en la resistencia a cortante de los materiales de refuerzo utilizados; de la varilla FRP y tiras de mortero geopolimérico.

6. REFERENCIAS

- ACI 318-05 and ACI 318R-05. 2005. "Building code requirements for structural concrete and commentary". American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Mich.
- ACI 440R-96. 1996. "State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastics (FRP) Reinforcement for Concrete Structures". American Concrete Institute (ACI).
- ACI 440.1R-01. 2001. Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Mich.
- ACI 440.1R-06. 2006. "Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars". American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Mich.
- ACI 549-R97. 1997. "State-of-the-Art Report on Ferrocement, Manual of Concrete Practice", American Concrete Institute (ACI), Detroit, 26pp.
- Alcocer S.M. 2003. "Capítulo 11: Rehabilitación de Estructuras de Mampostería", Edificaciones de Mampostería para Vivienda, Fundación ICA, A.C., ISBN 968-750865-5.
- ASTM C 67. "Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile".
- ASTM C88. "Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate".
- ASTM C109. "Test method for compressive strength of hydraulic cement mortars".
- ASTM C947. "Standard test method for flexural properties of thin-section glass fiber reinforced concrete".
- ASTM D638-99. "Test Method for Tensile Properties of Plastics, Vol. 08.01".
- ASTM D790. "Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials".
- ASTM D3916. "Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod".
- ASTM D5240. "Standard test method for testing rock slabs to evaluate soundness of riprap by use of sodium sulfate or magnesium sulfate".
- ASTM E519 "Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages".

- Benjamin M. Tang. 2003. “FRP Composites Technology Brings Advantages to the American Bridge Building Industry”. Office of Bridge Technology, U.S. DOT-Federal Highway Administration, Washington, D.C. Proceedings published in the 2nd International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications, Cairo, Egypt; December 16-18.
- Chalaye H. 2002. “Los materiales compuestos: Dinamismo e innovación”. Le 4 Pages des Statistiques Industrielles, DiGITIP, Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, ISSN: 1241-1515.
- CSA-S806. 2002. Design and construction of building components with fiber reinforced polymers – S806-02. Canadian Standards Association, Rexdale, Ont, Canada.
- Davidovits J. 1989. “Geopolymers and geopolymeric new materials”. J. Therm. Anal. 35 (2) 429–441.
- Davidovits J. 1993. “Geopolymer cement to minimize carbon-dioxide greenhouse-warming”. In: M. Moukwa, S.L. Sarkar, K. Luke, M.W. Grutzeck (Eds.), Cement-Based Materials: Present, Future, and Environmental Aspects, American Ceramic Society, Ceramic Transactions, Westerville, America, vol. 37, pp. 165–182.
- De Lorenzis L, Nanni A, La Tegola A. “Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods”. In: PLAST 2000, Milan, Italy.
- DSM Composite Resins, 2006, Guide to chemical resistance of polymeric resin, Atlac382 resin. Disponible en el sitio de Internet: www.dsmcompositeresins.com.
- Duxson P., J.L. Provis, G.C. Lukey, S.W. Mallicoat, W.M. Kriven, J.S.J. Deventer. 2005. “Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties”. Colloids Surf., A Physicochem. Eng. Asp. V.269, p. 47–58.
- ElGawady M., Lestuzzi P., and Badoux M. 2004. “A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM”. Proc., 13th Int. Brick and Block Masonry Conf., Amsterdam, The Netherlands, Paper No. 89.
- Guerra A.E., Naaman A.E. and Shah S.P. 1978. “Ferrocement Cylindrical Tanks: Cracking and Leakage Behavior”. ACI Journal, Proceedings, V. 75, No. 1, Jan., pp. 22-30.
- Holberg M. and Hamilton R. 2002. “Strengthening, URM with GFRP composites and ductile connections” Earthquake Spectra, 18(1), 63–84.
- Houssam T. and Yong D. 2003. “Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods”, Construction and Building Materials, 17, Elsevier, 69-74, 20.

- Japanese Society of Civil Engineering (JSCE). 1997. "Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials". Concrete Engineering Series, No. 23, JSCE, Tokyo, <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/publication-e.html>.
- Kadir M.R.A., Samad A.A.A., Muda Z.C., and Abang Abdullah A.A. 1997. "Flexural Behavior of Composite Beams with Ferrocement Permanent Formwork". *Journal of Ferrocement*, V. 27, No. 3, pp. 209-214.
- Kamiya R., B. Cheeseman, P. Popper and T-W. Chou, 2000, Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile preforms: a review, *Comp. Sci. & Tech.*, 60:33-47.
- Kaw Autar K. 1997. *Mechanics of Composites Materials*, CRC Press, New York, NY.
- Kumar P.R., Seshu D.R., Rao CBK. 2002. "Studies on high performance mortar mixes (Part I: strength and flow characteristics)". *Journal of Ferrocement*; 32(3):205–14.
- Lopez M. and Naaman, A.E. 1998. "Study of Shear Joints in Fiber Reinforced Plastic (FRP) Ferrocement Bolted Connections". *Ferrocement 6-Lambot Symposium, Proceedings of Sixth International Symposium on Ferrocement*, Naaman, A.E., Editor, University of Michigan.
- Lyon R.E., Foden A., Balaguru P.N., Davidovits M., Davidovits J. 1997. "Fire-resistant aluminosilicate composites". *J. Fire Mater.* 21 (2), 67–73.
- Magenes, G., and Calvi, G. M. (1997). "In-plane seismic response of brick masonry walls." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 26(11), 1091–1112.
- Malvar L.J. 1998. "Durability of Composites in Reinforced Concrete", CDCC'98 - First International Conference on Durability of Composites for Construction, Sherbrooke (Québec) Canada, August 1998.
- Masood A.M. and S. Akhtar M. Haquie. 2003. "Performance of ferrocement panels in different environments". *Cement and concrete research* V. 33, p. 555.
- Memon N.A., Salihuddin R.S., Mahyuddin R. 2007. "Performance of high workability slag-cement mortar for ferrocement". *Building and environment*, V. 42, p. 2710.
- Miller Tara. 1998. *Introduction to Composites*, 4th Edition, Composites Institute, Society of the Plastics Industry, New York, NY.
- Mouret M., A. Bascoul, G. Escadeillas. 1999. Microstructural features of concrete in relation to initial temperature—SEM and ESEM characterization, *Cem. Concr. Res.* 29 (3), 369–375.

- Murphy John. 1998. Reinforced Plastics Handbook, Elsevier Science, Oxford, England.
- Naaman A.E. and Chandransu K. 2000. “Bending Behavior of Laminated Cementitious Composites Reinforced with FRP Meshes”. High Performance Fiber Reinforced Concrete Thin Sheet Products, Edited by A. Peled, S.P. Shan and N. Banthia, ACI SP-190, American Concrete Institute, Farmington Hills, , pp. 97-116.
- Nanni A. 1993. Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement. J. Struct Engg, ASCE 1993; 119(11):3344–55.
- Nawy EG, Neuwerth GE. 1997. Fiberglass reinforced concrete slabs and beams. J. Struct Div, ASCE 1977; 103(ST2):421–40.
- Nelson W. 1990. “Accelerated testing—Statistical models, test plans, and data analyses”. Wiley, New York.
- Neville A., “Tecnología del Concreto”, 1ª. Edición 1999, Editado por el Instituto Mexicano del Cemento y Concreto A. C. (IMCYC) bajo convenio con Addison Wesley Longman Limited. ISBN 968-464-092-7.
- NMX-C-404-ONNCCE. “Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-especificaciones y métodos de prueba”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 9 pp.
- NMX-C-061-ONNCCE. “Industria de la construcción–Cementos–Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos”.
- NTCM-2004 (2004). “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre.
- Razaqpur AG, Svecova D, Cheung MS. 2000. Rational method for calculating deflection of fiber reinforced polymer reinforced beams. ACI Struct J. 2000; 97(1):175–84.
- Reinhorn A.M., and Maden A. 1995. “Evaluation of TYFO-W fiber wrap system for in plane strengthening of masonry walls”. Rep. No.95-0002, Dept. of Civil Engineering, State Univ. of New York at Buffalo, Buffalo, N.Y.
- Reyes-Araiza J.L., A. Manzano-Ramírez, J.C. Rubio-Avalos, E. González-Sosa, J. F. Pérez-Robles, M. Arroyo-Contreras, C. Signoret, E. Castillo-Castañeda, Y.V. Vorobiev, 2008. “Comparative study on tensile behavior of inorganic fibers embedded in unsaturated polyester bisphenol “A”–styrene co-polymer”. Springer, Inorganic Materials, Pleiades Publishing, Ltd. Mayo 2008, ISSN 0020-1685, Vol. 44, No. 5, pp. 549–554.

- Saadatmanesh H, Ehsani MR. 1991. Fiber composite bars for reinforced construction. *J Compos Mat* 1991; 25(2):188–203.
- Saadatmanesh H. 1994. “Fiber composites for new and existing structures” *ACI Struct. J.*, 91(3), 346–354.
- Schwegler G. 1994, “Masonry construction strengthened with fiber composites in seismically endangered zones”. 10th, ECEE., Vienna, 2299–2303.
- Shah S.P and Naaman A.E. 1978. “Crack Control in Ferrocement and its Comparison with Reinforced Concrete”. *Journal of Ferrocement*, V. 8, No. 2, pp.67-80.
- Shapria A, Bank LC. 1997. Constructability and economics of FRP reinforced cages for concrete beams. *J Compos Constr*, ASCE 1997; 1(3):82–9.
- Sonobe Y, Fukuyama H, Okamoto T, Kani N, Kimura K, Kobayashi K. 1997. Design guidelines of FRP reinforced concrete building structures. *J. Compos Constr.*, ASCE 1997; 1(3):90–115.
- Stevenson M., K. Sagoe-Crentsil. 2005. “Relationship between composition, structure and strength of inorganic polymers: part 1—metakaolin-derived inorganic polymers”. *J. Mater. Sci.* V.40, p. 2023.
- Taft P. and Birsa R., 1984. “Transverse Strength for Pultruded Parts”. *Plast. Engng.*, 40, (5), 634.
- Theriault M, Benmokrane B. 1988. Effect of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams. *J Compôs Constr*, ASCE 1988; 2(1):7–16.
- Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-resistant design of masonry buildings*, Imperial College Press, London.
- Triantafillou T.C. 1998. “Strengthening of masonry structures using epoxy bonded FRP laminates”. *ASCE J Compos Constr.*; 2(2):96–104.
- Tumialan G.J., Galati N, Namboorimadathil S.M., Nanni A. 2002. “Strengthening of masonry with FRP bars”. *ICCI 2002*, San Francisco, CA, 2002.
- Van Deventer J.S.J., P. Duxson, S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W.M. Kriven. 2007. “The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers”. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* V. 292, p. 8–20.
- Wang S., Naaman A.E., Li V. 2004. “Bending response of hybrid ferrocement plates with meshes and fibers”. *Journal of ferrocement*, V.34, No. 1, p. 275.

Xiao J., Li J, Zha Q. 2004. Experimental study on bond behavior between FRP and concrete. *Constr Build Mat*, ELSEVIER. 2004; 18: 745–52.

Yost JR, Gross SP, Dinehart DW. 2001. Shear strength of normal strength concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *J. Compôs Constr*, ASCE 2001; 5(4): 268–75.

APENDICE

APÉNDICE 1. RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON MURETES REFORZADOS CON VARILLAS FRP

Los resultados de la experimentación se agrupan en dos bloques, en el primero se incluyen los correspondientes a los muretes reforzados con las varillas FRP, en el segundo se incluyen los relacionados a los muretes reforzados con tiras de mortero geopolimérico reforzadas con malla. En la tabla final de cada sección se agrupan los datos estadísticos correspondientes a la media, desviación estándar, coeficiente de variación, resistencia nominal de diseño del cortante y modulo de rigidez nominal, de todos los tipos de muretes ensayados.

Resistencia al cortante de muretes reforzados con varillas FRP

**Tabla A.1. Resistencia a cortante de muretes sin refuerzo:
Referencia para muretes con varillas FRP**

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M1-NR	7.45	7.58
	7.35	
	7.94	
M2-NR	8.4	8.7
	8.5	
	9.2	
M3-NR	6.8	7.03
	7	
	7.29	

Tabla A.2. Resistencia a cortante de muretes reforzados con varillas VFB

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M4-R-VFB	10.5	11.86
	11.64	
	13.44	
M5-R-VFB	9	10.76
	10.1	
	13.18	
M6-R-VFB	7.25	9.11
	8.93	
	11.15	

Tabla A.3. Resistencia a cortante de muretes reforzados con varillas VFE

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm2)	
	Datos	Media
M7-R-VFE	9.16	8.82
	8.1	
	9.2	
M8-R-VFE	7.75	9.1
	9.4	
	10.15	
M9-R-VFE	8.7	9.43
	10.3	
	9.29	
M10-R-VFE	13.44	14.8
	14.58	
	16.38	

Tabla A.4. Resistencia a cortante de muretes rehabilitado con varillas VFE

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm2)	
	Datos	Media
M11-RH	8.66	7.76
	6.5	
	8.12	

Tabla A.5. Datos estadísticos y resistencia nominal a cortante:

Muretes reforzados con varillas FRP

	Resistencia a cortante (Kg/cm2)				
	\bar{V}_m	σ_v	C_v	V_m^*	
				Dis. Normal	Dis. Log normal
No reforzados	7.77	0.85	0.11	6.07	6.09
Reforzados con varilla VFE	11.02	2.85	0.26	5.32	6.68
Reforzados con varilla VFB	11.31	0.78	0.07	9.75	9.63

\bar{V}_m = Resistencia a cortante promedio,

σ_v = Desviación estándar,

C_v = Coeficiente de variación,

V_m^* = Resistencia nominal a cortante.

Modulo de rigidez de muretes reforzados con varillas FRP

**Tabla A.6. Modulo de rigidez de muretes sin refuerzo:
Referencia para muretes con varillas FRP**

Serie	Módulo de Rigidez (Kg/cm2)	
	Datos	Media
M1-NR	802	842.2
	822.3	
	902.3	
M2-NR	896.7	966.7
	951.7	
	1051.7	
M3-NR	851.6	864.2
	860	
	881	

Tabla A.7. Modulo de rigidez de muretes reforzados con varillas VFB

Serie	Modulo de Rigidez (Kg/cm2)	
	Datos	Media
M4-R-VFB	1853	1976.7
	1988.55	
	2088.55	
M5-R-VFB	1650	1793
	1820	
	1909	
M6-R-VFB	1370	1518.3
	1430	
	1754.9	

Tabla A.8. Modulo de rigidez de muretes reforzados con varillas VFE

Serie	Modulo de Rigidez (Kg/cm2)	
	Datos	Media
M7-R-VFE	1671	1764
	1691	
	1930	
M8-R-VFE	1762	1820
	1790	
	1908	
M9-R-VFE	4600	4715
	4315	
	5230	
M10-R-VFE	2750	2467
	2275.5	
	2375.5	

Tabla A.9. Modulo de rigidez de muretes rehabilitado con varillas VFE

Serie	Modulo de Rigidez (Kg/cm2)	
	Datos	Media
	740	
M11-RH	906.6	862.2
	940	

Tabla A.10. Datos estadísticos y Módulo de rigidez a cortante:

Muretes reforzados con varillas FRP

Modulo de rigidez (Kg/cm2)					
	\bar{G}_m	σ_G	C_G	G_m^*	
				Dis. Normal	Dis. Log normal
No reforzados	891.03	66.5	0.07	758.1	758.3
Reforzados con varilla VFE	1763	231	0.13	1301.3	1330.3
Reforzados con varilla VFB	2692	1386	0.51	-80.9	1183.1

\bar{G}_m = Módulo de rigidez a cortante promedio,

σ_G = Desviación estándar,

C_G = Coeficiente de variación,

G_m^* = Módulo de rigidez nominal a cortante.

APÉNDICE 2. RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS CON MURETES REFORZADOS CON TIRAS DE MORTERO GEOPOLIMÉRICO

Resistencia al cortante de muretes reforzados con tiras de mortero geopolimérico

Tabla A.11. Resistencia a cortante de muretes sin refuerzo: Referencia para muretes con tiras de mortero geopolimérico

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M1-NR	4.45	4.8
	4.35	
	4.94	
M2-NR	3.4	3.9
	3.5	
	4.2	
M3-NR	4.8	4.64
	4	
	4.29	

Tabla A.12. Resistencia a cortante de muretes reforzados con una tira en cada cara

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M4-RG2CC	7.5	7.08
	7.64	
	8.44	
M5-RG2CC	5	5.15
	5.1	
	6.18	
M6-RG2CC	6.25	6.6
	6.93	
	7.15	

Tabla A.13. Resistencia a cortante de muretes reforzados con una tira en una cara

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M7-RG1CC	7.16	7.34
	8.1	
	7.2	
M8-RG1CC	7.3	7.07
	7.4	
	7.01	
M9-RG1CC	6.4	6.1
	6.8	
	5.29	

Tabla A.14. Resistencia a cortante de muretes reforzados sobre una cara con una tira al centro y dos tiras en los extremos

Serie	Esfuerzo Cortante (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M10-RG1CE	7.3	6.78
	6.4	
	7.01	
M11-RG1CE	7.75	8.38
	8.7	
	9.15	
M12-RG1CE	6.15	6.5
	6.93	
	7.02	

Tabla A.15. Datos estadísticos y resistencia nominal a cortante:

Muretes reforzados con varillas FRP

Resistencia a cortante (Kg/cm ²)					
	\bar{V}_m	σ_v	C_v	V_m^*	
				Dis. Normal	Dis. Log normal
No reforzados	4.45	0.48	0.108	3.5	3.5
Reforzados con tiras RG2CC	6.3	1.0	0.16	4.3	4.5
Reforzados con tiras RG1CC	6.8	0.65	0.095	5.5	5.5
Reforzados con tiras RG1CE	7.2	1.01	0.14	5.2	5.3

\bar{V}_m = Resistencia a cortante promedio,

σ_v = Desviación estándar,

C_v = Coeficiente de variación,

V_m^* = Resistencia nominal a cortante.

Modulo de rigidez al cortante de muretes reforzados con tiras de mortero geopolimérico

**Tabla A.16. Modulo de rigidez de muretes sin refuerzo:
Referencia para muretes con tiras de mortero geopolimérico**

Serie	Módulo de Rigidez (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M1-NR	982	960
	822.3	
	1082.3	
M2-NR	876.7	975
	911.7	
	1011.7	
M3-NR	1351.6	1160
	1060	
	1081	

Tabla A.17. Modulo de rigidez de muretes reforzados con una tira en cada cara

Serie	Modulo de Rigidez (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M4-RG2CC	2853	2360
	1983	
	2069	
M5-RG2CC	1550	1717
	1820	
	1850	
M6-RG2CC	2470	2300
	1430	
	2755	

Tabla A.18. Modulo de rigidez de muretes reforzados con una tira en una cara

Serie	Modulo de Rigidez (Kg/cm ²)	
	Datos	Media
M7-RG1CC	2710	2447
	2391	
	2430	
M8-RG1CC	2210	2357
	2191	
	2430	
M9-RG1CC	2040	1968
	2115	
	1830	

Tabla A.19. Modulo de rigidez de muretes reforzados sobre una cara con una tira al centro y dos tiras en los extremos

Serie	Modulo de Rigidez (Kg/cm2)	
	Datos	Media
M10-RG1CE	2510	2360
	2191	
	2330	
M11-RG1CE	2762	2793
	2908	
	2790	
M9-RG1CE	1950	2167
	2315	
	2150	

Tabla A.20. Datos estadísticos y Módulo de rigidez a cortante: Muretes reforzados con tiras de mortero geopolimérico

Modulo de rigidez (Kg/cm2)					
	\bar{G}_m	σ_G	C_G	G_m^*	
				Dis. Normal	Dis. Log normal
No reforzados	1031.67	111.39	0.11	808.9	812.4
Reforzados con tiras RG2CC	2125.7	355.18	0.17	1415.3	1499.3
Reforzados con tiras RG1CC	2257.3	254.58	0.11	1748.2	1761
Reforzados con tiras RG1CE	2440	320.6	0.13	1798.8	1837

\bar{G}_m = Módulo de rigidez a cortante promedio,

σ_G = Desviación estándar,

C_G = Coeficiente de variación,

G_m^* = Módulo de rigidez nominal a cortante.