

**MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON FRP: ENSAYOS DE
TENSIÓN DIAGONAL EN MURETES REFORZADOS**

JONATHAN ALBERTO LÓPEZ LARA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

**MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON FRP: ENSAYOS DE
TENSIÓN DIAGONAL EN MURETES REFORZADOS**

JONATHAN ALBERTO LÓPEZ LARA

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Ing. OSCAR BEGAMBRE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

El autor del proyecto expresa sus más sinceros agradecimientos a:

La Universidad Industrial de Santander, a la Escuela de Ingeniería Civil, por la excelente formación académica y humanística brindada, fundamento sólido para un buen desempeño profesional.

Mi director de tesis, Ing. Oscar Javier Begambre, por sus valiosas orientaciones y sugerencias.

Todas las personas que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo exitoso del proyecto de grado.

Jonathan Alberto López Lara

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	14
2.1 LA MAMPOSTERÍA	14
2.1.1 Unidades	14
2.1.2 Mortero de pega	14
2.1.3 Comportamiento de la mampostería como material compuesto	15
2.1.3.1 Diseño Específico del FRP	15
2.1.3.2 Modelos de muros de mampostería reforzados estructuralmente con FRP	16
2.1.4 Refuerzo con fibras para la mampostería estructural	16
3. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN, CARÁCTERIZACIÓN DEL MATERIAL FRP Y DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	18
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	18
3.1.1 Materiales empleados	19
3.1.2 Geotextil FRP Utilizado	19
3.1.3 Elección del Pegante para la Interfaz del Refuerzo	19
3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	20
3.2.1 Ensayo de compresión diagonal	20
3.2.2 Condiciones de laboratorio	20
3.2.4 Construcción de especímenes	21
4. DETERMINACIÓN DE CARGAS Y ANÁLISIS DEL REFUERZO	25
4.1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL DE LOS MUROS SEGÚN LA NSR-10	25

4.2 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA TEÓRICA CONTRA LA RESISTENCIA SOLICITADA	30
4.3 ANÁLISIS DE UN MURETE SOMETIDO A CARGA EN SU DIAGONAL	30
5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES	32
5.1 CURVAS DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES Y HORIZONTALES CONTRA CARGA	32
5.2 DETERMINACIÓN DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN CORTANTE PARA LOS MUROS	34
5.3 CURVAS ESFUERZO CORTANTE CONTRA DEFORMACIÓN CORTANTE	36
5.4 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE FUERZAS Y ESFUERZOS MÁXIMOS PARA CADA MURETE	38
5.5 ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE COSTOS	39
CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	42
BIBLIOGRAFIA	43

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o proporción NSR-10, 2010	15
Tabla 2. Muros empleados en los ensayos de laboratorio	21
Tabla 3. Valores usados para la obtención de resultados	36
Tabla 4. Esfuerzo cortante según tipo de murete	38
Tabla 5. Resultados de laboratorio	38

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Montaje experimental	22
Figura 2. Compresión diagonal del murete	22
Figura 3. Máquina de ensayos universales MTS Test System 810	23
Figura 4. Falla en uno de los muretes utilizados en el experimento	23
Figura 5. Falla en el murete por compresión diagonal	31
Figura 6. Curva Carga Vs Desplazamiento vertical	32
Figura 7. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 1	33
Figura 8. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 2	33
Figura 9. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 3	34
Figura 10. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 4	34
Figura 11. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 1	36
Figura 12. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 2	37
Figura 13. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 3	37
Figura 14. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 4	37

RESUMEN

Título: MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON FRP: ENSAYOS DE TENSIÓN DIAGONAL EN MURETES REFORZADOS*

Autor: LÓPEZ LARA, Jonathan Alberto**

Palabras Clave: Muros de mampostería, Geotextil FRP, reforzamiento, tensión diagonal, resistencia, ventajas, costo-beneficio

Descripción

En este trabajo de grado se presenta un estudio sobre el comportamiento experimental de la tensión diagonal en muros de mampostería reforzadas con FRP (geotextiles), los cuales son una alternativa exequible dada la fácil manipulación del material y el aumento de resistencia que puede ofrecer a estructuras mecánicas y civiles. En las pruebas de laboratorio realizadas se evaluaron aspectos como cargas vs. Deformación; curvas de desplazamiento verticales y horizontales contra carga para cada uno de los muretes; determinación de esfuerzo y deformación cortante para los muros; curvas de esfuerzo cortante contra deformación cortante; comparación de fuerzas y esfuerzos máximos para cada murete y análisis simplificado de costos. Los resultados muestran que los muros de mampostería reforzados con FRP, especialmente las que utilizan el geotextil TR 3000 de PAVCO, a 90°, presentan un aumento significativo de la resistencia a cortante del 19,81%, lo cual muestra lo conveniente que es el uso de dicho material para las estructuras especialmente para las que requieren un plus en su capacidad a esfuerzos cortantes, sin embargo cabe resaltar que el costo-beneficio debe ser estudiado antes de aplicar dicho refuerzo en mampostería tradicional y considerar su uso a elementos que lo requieran o se quiera proteger de la separación de sus componentes ante un sismo, como lo son elementos no estructurales en fachadas, muros esbeltos, etc.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ing. Oscar Begambre

SUMMARY

Title: REINFORCED MASONRY WALLS FRP: STRESS TESTS IN WALLS REINFORCED BIAS*

Author: LOPEZ LARA, Jonathan Alberto**

Keywords: Masonry walls, geotextile FRP reinforcement, diagonal voltage, resistance, benefits, cost-benefit

Description

In this paper grade a study on the experimental behavior of the diagonal tension in masonry walls reinforced with FRP (geotextiles), which are given the easy handling of the material and increased resistance that can provide structures exequible alternative is presented mechanical and civil. In laboratory tests they were evaluated as fillers aspects vs. Deformation; curves vertical and horizontal scroll against load for each low walls; determination of stress and shear strain for the walls; curves of shear stress against shear deformation; comparison of forces and maximum for each low wall and simplified cost analysis efforts. The results show that the masonry walls reinforced with FRP, especially those using the geotextile PAVCO TR 3000, at 90, have a significant increase in the shear strength of 19.81%, which shows how convenient is the use of such material for structures especially for those who need a plus in their ability to shear stresses, however it should be noted that the cost-benefit should be studied before applying such reinforcement in traditional masonry and consider using elements that require or you want to protect the separation of components in an earthquake, as are non-structural elements in facades, slender walls, etc.

* Graduation project

** Faculty of Engineering physicomechanical. School of Civil Engineering. Director: Oscar Begambre Ing.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de contar con materiales más resistentes, con mayores beneficios en la mampostería ha generado el desarrollo de nuevas tecnologías en donde se agregan fibras para aumentar la resistencia, una de estas son los polímeros reforzados con fibra (FRP), los cuales son geotextiles que son una alternativa interesante por el aporte en el aumento de resistencia que puede ofrecer a estructuras mecánicas y civiles, demostrado esto en pruebas experimentales que así lo corroboran. [1]

El refuerzo con fibras es un método de rehabilitación estructural comúnmente utilizado que se lleva a cabo mediante la adhesión de determinada fibra a la superficie del muro, en dirección paralela a la aplicación de la fuerza cortante. En este orden de ideas, este artículo presenta los resultados de pruebas de laboratorio, en donde se evaluó la tensión diagonal en muros de mampostería reforzados con FRP; en los cuales se determinó el comportamiento del muro en aspectos como: relación carga-deformación; comportamiento del muro con distintas configuraciones de refuerzo con FRP y los cambios experimentados en la resistencia a cortante con el uso o la ausencia de refuerzo.

Los materiales utilizados para los ensayos de tensión diagonal fueron los geotextiles TR 3000 y T 2400 de Pavco [2], los cuales están conformados por un sistema de cintas planas, tejadas entre sí, diseñados para aplicaciones en donde se necesite refuerzo, y en su elaboración se sigue la norma de calidad ISO 9001:2008. Para la realización de los ensayos se tomaron muros cuadrados de 50 cm, con cada uno de ellos se realizaron pruebas con diferentes configuraciones y tipos de material. Se emplearon muros sin refuerzo; muro completamente reforzado; y muro reforzado en dirección transversal. El presente artículo sintetiza los resultados obtenidos para distintas configuraciones de refuerzo, con FRP y el aumento de resistencia reportados en ensayos que midieron la tensión diagonal en los muretes.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la resistencia a cortante de muros de mampostería reforzados con FRP (polímeros reforzados con fibra).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar en forma experimental la relación carga-deformación en muros de mampostería reforzados con FRP (curva esfuerzo cortante-deformación angular, módulo cortante).
- Realizar ensayos de laboratorio y determinar el comportamiento del muro, con distintas configuraciones de refuerzo con FRP.
- Identificar los cambios que se presentan en la resistencia a cortante con el uso o ausencia de refuerzo con geotextil.

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 LA MAMPOSTERÍA

2.1.1 Unidades. Las unidades utilizadas en la construcción de mampostería estructural pueden ser de concreto, cerámica (arcilla cocida) o de piedra. Los ladrillos son piezas cerámicas, de forma octaédrica, obtenida por moldeo, secado y cocción a altas temperaturas, de una pasta de arcilla. Según el tipo de mampostería estructural y el tipo de refuerzo, las unidades pueden ser de perforación vertical; perforación horizontal o piezas sólidas.

De acuerdo a la norma NSR-10, las unidades sólidas son aquellas cuyas cavidades ocupan menos del 25% del volumen de la pieza. Los ladrillos presentan un comportamiento tipo elástico-frágil, pero no necesariamente homogénea o isotrópica, las diferentes caras del ladrillo reciben el nombre de tabla, canto y testa. [1]

Las propiedades mecánicas del bloque dependen de su naturaleza constitutiva, los más importantes para el análisis estructural son la densidad, el módulo de deformación longitudinal y la resistencia a compresión. [2]

2.1.2 Mortero de pega. El mortero de pega utilizado en mampostería es una mezcla de cemento, arena y agua, en diferentes proporciones según resistencia requerida. La composición se basa en ensayos previos y se clasifican como H, M, S, o N; con diferentes valores para la resistencia a la compresión, los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o proporción NSR-10, 2010

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad ⁽¹⁾			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión f'_c MPa ⁽²⁾	Flujo en (%) ⁽³⁾	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada ⁽⁴⁾	Cemento para Mampostería ⁽⁷⁾	Arena/Material Cementante ⁽⁵⁾	
							Mín.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.0
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.5
				0.5	no aplica	1	2.50	3.0
N ⁽⁶⁾	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.5
				0	no aplica	1	3.00	4.0

2.1.3 Comportamiento de la mampostería como material compuesto. La mampostería transmite de manera muy efectiva las cargas de compresión. Para establecer la resistencia, el parámetro fundamental son las propiedades mecánicas de los ladrillos, debido a que la falla se da por el agrietamiento, a causa de la tracción transversal sobre los mismos, provocada por una expansión diferencial lateral de las unidades y una ductibilidad mayor del mortero.

El comportamiento de la mampostería, está sujeto a la orientación de las juntas del mortero y a las cargas aplicadas. Tiene influencia en el modo de falla el grado de compresión a que se vea sometida la mampostería; puede presentarse desde una falla solo en las juntas o una combinación de fisura que integra a la junta y al mortero.

2.1.3.1 Diseño Específico del FRP. La resistencia suministrada por el FRP a muros sometidos a cortante y flexión, se calculan según FEFY CO LLC [3], con la siguiente ecuación:

Resistencia suministrada por FRP en ambos lados del muro (cortante).

$$\phi V = (k) \phi^2 (t_f)(f_j)(H)(\sin^2\theta) \quad \text{Ecuación 1}$$

k = factor de eficiencia (0.75, 1, 2)

t_f = espesor del FRP (in)

$f_j = \epsilon E_G$ (esfuerzo garantizado)

$E_G = C_G E$ (módulo de elasticidad garantizado)

ϵ = deformación máxima de la sección del muro

C_G = factor de reducción ambiental

E = módulo de elasticidad del FRP (ksi)

H = altura del muro (in)

$\phi = 0,85$ (según ACI 318)

θ = inclinación de la fibra principal del FRP

2.1.3.2 Modelos de muros de mampostería reforzados estructuralmente con FRP. Para el uso comercial todo material constructivo se debe someter a rigurosas pruebas de laboratorio en donde se evalúan las propiedades físicas, mecánicas, químicas y eléctricas. Pero si se va a utilizar como refuerzo estructural, este material se debe someter a modelamientos más elaborados, experimentales o numéricos que aseguren un buen comportamiento mecánico (aumento de resistencia y ductilidad), ante las condiciones de esfuerzo a que será sometida la estructura a reforzar.

2.1.4 Refuerzo con fibras para la mampostería estructural. El refuerzo con fibras es un método de rehabilitación estructural con el cual se logra aumentar la resistencia de los muros de mampostería; este refuerzo se ejecuta mediante la adhesión de una determinada fibra a la superficie del muro, en dirección paralela a la aplicación de la fuerza cortante. En el mercado se encuentra una amplia variedad de fibras, algunas de ellas son las de refuerzo de polímero (FRP), como las de carbono y de vidrio.

En Ingeniería Civil, estos materiales son muy usados por la integridad que da a la estructura, especialmente en eventos sísmicos, dado que anteriormente las edificaciones fueron construidas para resistir cargas verticales y no se consideró el componente horizontal, con lo cual en caso de sismo la estructura resultaba seriamente dañada [4].

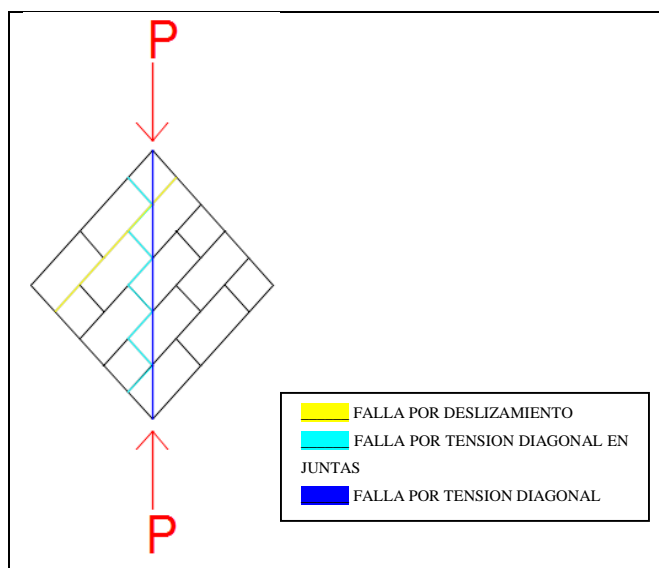
3. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN, CARÁCTERIZACIÓN DEL MATERIAL FRP Y DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La mampostería como material compuesto transmite las cargas de compresión, y los materiales ofrecen resistencia de acuerdo a las propiedades mecánicas que posean. Las fallas que se presentan se forman como agrietamientos a causa de la tracción transversal, provocada por una expansión diferencial lateral de las unidades y una ductibilidad mayor del mortero [1]. Por lo general, las deformaciones aparecen en las juntas y varían según la magnitud del cortante y la tensión normal. Cabe aclarar que no todos los mecanismos de fractura en mampostería han sido del todo desarrollados [5].

En la figura 1, se muestran los tipos de fallas posibles que se pueden presentar en la mampostería.

Figura 1. Tipos de falla en muretes



Fuente: D Páez, S Parra, C Montaña. Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería. En: Rev. Universidad de Medellín, vol. 8, No. 14. [5]

3.1.1 Materiales empleados

- **Ladrillo.** Para este tipo de ensayo se opta por ladrillo cocido tradicional macizo, puesto que es el más usado, tanto en mampostería confinada como en fachadas y viviendas en los estratos medios. Además de ser el tipo de ladrillo de peor comportamiento ante un esfuerzo a cortante, puesto que la fuerza en su estructura recae sobre la pega.
- **Mortero de pega.** Para este ensayo en particular se optó por una dosificación de 1:3 siendo este el más usado por maestros y mamposteros en la zona de Bucaramanga. Cabe resaltar que la calidad del mortero influye, así como su buena aplicación y la preparación de la superficie a pegar. La superficie a pegar, esta se debe encontrar como superficie saturada seca (SSS).

3.1.2 Geotextil FRP Utilizado. Los materiales utilizados para los ensayos de tensión diagonal fueron geotextiles TR 3000 y T2400 de PAVCO; el primero es un polipropileno conformado por un sistema de cintas planas, tejidas entre sí, diseñado para aplicaciones en donde se necesite refuerzo.

3.1.3 Elección del Pegante para la Interfaz del Refuerzo. Para el método de pega del geotextil con los muros se utilizó en un principio solo friso (arena con cemento) más cargado de lo común, y se llegó a la conclusión que no es útil y se suelta, puesto que el material es denso y crea una película dilatadora entre las superficies a unir. Es por esto que se decidió usar anclajes y para evitar el desgarramiento del geotextil se usaron arandelas para aumentar el área de contacto entre las superficies a unir. Dicho experimento resulto positivo puesto que las fallas ocurrieron primero en zonas de mayor concentración de esfuerzo que en el pegue del geotextil con el muro. Dicha junta no proporciona gastos considerables, ni pierde estética al ser aplicado y puede frisarse o si se desea ahorrar costos para su acabado se puede usar pasta arena y el geotextil lo recibe sin problema alguno.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

3.2.1 Ensayo de compresión diagonal. La realización de este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia de los muros de mampostería, de forma experimental, ante esfuerzos cortantes o de tensión diagonal generados por la aplicación de una carga en una de sus diagonales; produciéndose así una falla. [6] Este método se desarrolló para determinar de manera precisa el esfuerzo cortante que resiste la mampostería (ASTM-E519-02). Los muretes deben una longitud de al menos una vez y media veces, la longitud de la pieza y el número de hiladas necesarias para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud (NTCM, 2004). [7]

El número de especímenes debe ser al menos tres, del mismo tamaño, después de constituidos no deben moverse al menos por siete (7) días; deberán ser guardados en el laboratorio por 28 días.

3.2.2 Condiciones de laboratorio. En el proceso de determinar la contribución que genera el reforzamiento con mallas de fibra de FRP, a la resistencia de un muro de mampostería, se hizo necesario la realización de un experimento donde se obtengan las características mecánicas de los muretes de mampostería, ante la acción de una fuerza cortante, como una representación de lo que sería el esfuerzo presentado en un muro en el momento de ocurrencia de un evento sísmico.

Por tal motivo, se requirió un ensayo antes y después del reforzamiento con geotextil. Este se realizó en el laboratorio de Estructuras de la Escuela de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander, de acuerdo a la normatividad técnica ya mencionada.

3.2.3 Esquema experimental. Para la realización de los ensayos se elaboraron cuatro muros cuadrados de ensayo de 50 cm de lado. Para cada uno se realizaron

pruebas con diferentes configuraciones y tipos de material. Las configuraciones empleadas en este trabajo se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Muros empleados en los ensayos de laboratorio

TIPOS DE MURETES A FALLAR	MURO TIPO 1	MURO TIPO 2	MURO TIPO 3	MURO TIPO 4
REFUERZO	No presenta refuerzo de ninguna clase.	Refuerzo sencillo completo de FRP T2400, colocadas a 90° con respecto a la horizontal.	Muro con refuerzo sencillo completo de FRP TR3000, colocadas a 90°, permite establecer una comparación de cómo aumenta la resistencia a causa de la variación de espesor de material a reforzar.	Presenta un refuerzo sencillo en tiras de malla de FRP TR2400 cada 2 la drillos con respecto a la horizontal, y de 7 cm de grosor, en total se usaron 3 tirillas de malla por murete de prueba.

Con el fin de no causar daños en los puntos angulosos de los muretes se construyó un transmisor de carga metálico el cual facilita la aplicación de la carga, esto contribuye a no alterar el módulo de elasticidad del material analizado.

3.2.4 Construcción de especímenes. La construcción de los muretes se realizó con un maestro de construcción con más de 20 años de experiencia con la intención de reproducir, de forma fiel, la manera de construir muros en muchas obras de nuestro entorno. Se empleó mortero de pega con especificaciones de 1:3:3. Los muretes se mantuvieron en curado por 28 días, hidratándolos a diario como se hace en una obra común. Posteriormente se procedió a colocar el geotextil según las configuraciones de refuerzo especificadas en la tabla 2.

En las figuras 2 y 3 se muestra el montaje experimental de los muretes, y la compresión diagonal a la que fueron sometidos.

Figura 2. Montaje experimental



Figura 3. Compresión diagonal del murete



Se utilizó la máquina de ensayos universales MTS Test System 810 (ver figura 4), la cual posee la capacidad de realizar pruebas de carga estáticas y dinámicas con capacidad de hasta 500 KN. Esta máquina permite desarrollar pruebas de tensión, compresión, fatigas, fractura mecánica y durabilidad de materiales.

Figura 4. Máquina de ensayos universales MTS Test System 810



Fuente: Laboratorio de Estructuras. Escuela de Ingeniería civil -UIS

A continuación se presenta un detalle del montaje experimental típico utilizado para determinar la resistencia de muros de mampostería reforzados con FRP (ver figura 5)

Figura 5. Falla en uno de los muretes utilizados en el experimento



En la figura 5 la línea roja muestra el tipo de falla que se presentó en uno de los muretes ensayados, en este caso se trata de una falla combinada. Este tipo de falla se presenta normalmente cuando la resistencia a la tensión de las piezas es menor en relación con la resistencia de adherencia del mortero a las piezas. Se caracteriza porque los muros presentan agrietamiento y ruptura de algunas de sus piezas, al

igual que del mortero. Aun cuando este tipo de falla involucra piezas y mortero, no presenta una trayectoria paralela a la diagonal cargada del muro.

4. DETERMINACIÓN DE CARGAS Y ANÁLISIS DEL REFUERZO

4.1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL DE LOS MUROS SEGÚN LA NSR-10

Según lo contemplado en la Norma NSR-10 de 2010, se llevó a cabo el siguiente proceso:

Primeramente se determinó la resistencia de la mampostería a compresión f'_m , por medio de requisitos históricos; determinación experimental en muretes de prueba o ensayos en materiales individuales. En este caso los cálculos se realizaron a partir de ensayos sobre los materiales individuales, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$R_m = \left(\frac{2h}{75+3h} \right) f'_{cu} + \left(\frac{50k_p}{75+3h} \right) f'_{cp} \leq 0.8f'_{cu}$$

Ecuación 2

h : Altura de la unidad de mampostería, en [mm]

k_p : Factor de corrección por absorción de la unidad, adimensional, en la determinación de la resistencia a la compresión de la mampostería no inyectada.

$k_p = 1.4$ para unidades de concreto

$k_p = 0.8$ para unidades de arcilla o sílico-calcáreas

f'_{cp} : Resistencia especificada a la compresión del mortero de pega MPa.

f'_{cu} : Resistencia especificada a la compresión de la unidad de mampostería medida sobre área neta, MPa.

R_m : Parámetro definido por medio de la ecuación

Siendo,

$$\begin{aligned}h &= 70 \text{ [mm]} \\k_p &= 0.8 \\f'_{cp} &= 4.0 \text{ [Mpa]} \\f'_{cu} &= 10.51 \text{ [Mpa]} \\R_m \text{ Formula} &= 5.72 \\0,8f'_{cu} &= 8.408 \\R_m \text{ Tomado} &= 5.72\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f'_m &= 0.75R_m \\f'_m &= 4.29 \text{ [Mpa]}\end{aligned} \quad \text{Ecuación 3}$$

Una vez determinado f'_m se procede a calcular el módulo de elasticidad y de cortante de la NSR-10. Los registros históricos del módulo de elasticidad determinados experimentalmente para proyectos de construcción, pueden utilizarse en diseños posteriores de obras con materiales similares. En ausencia de los valores experimentales como es el caso de este estudio, puede emplearse lo siguiente:

Para mampostería en arcilla el módulo de elasticidad según la ecuación es

$$\begin{aligned}E_m &= 900f'_m \leq 20000 \text{ [Mpa]} \\E_m &= 3219.868 \text{ [Mpa]}\end{aligned} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para mampostería en arcilla el módulo de cortante según la ecuación es

$$\begin{aligned}G_m &= 0.4E_m \\G_m &= 1287.947 \text{ [Mpa]}\end{aligned} \quad \text{Ecuación 5}$$

Con el fin de hacer un análisis de esfuerzos de trabajo admisibles, se deben determinar ciertas características dimensionales efectivas de la (NSR-10, 2010) y se muestran en detalle a continuación:

l_w : Longitud horizontal del muro, [mm]

A_e : Área efectiva de la sección de mampostería, [mm²]

t : Espesor efectivo de la sección para evaluar efectos de pandeo, [mm]

h' : Altura efectiva de la sección para evaluar efectos de pandeo, [mm]

b : Ancho efectivo, [mm]

$$b = \frac{A_e}{l_w}$$

Ecuación 6

A_{mv} : Área efectiva para determinar esfuerzos cortantes, [mm²]

$$A_{mv} = bl_w$$

Ecuación 7

h'/t : Factor

R_e : Factor de Reducción por esbeltez

$$R_e = 1 - \left[\frac{h'}{42t} \right]^2 \text{ para } \frac{h'}{t} \leq 30$$

$$R_e = \left[\frac{21t}{h'} \right]^2 \text{ para } \frac{h'}{t} < 30$$

Ecuación 8

A partir de los parámetros definidos en los numerales anteriores se procede a hacer un análisis por esfuerzos de trabajo admisibles para determinar las resistencias teóricas de los muros construidos en el laboratorio, como se muestra:

Esfuerzo y Fuerza de compresión Axial:

$$F_a = 0.2f'_m R_e$$

$$F_a = 0.730 \text{ [Mpa]} \quad \text{Ecuación 9}$$

Para determinar la fuerza a compresión que resiste el muro se operó el esfuerzo con el área que trabaja a compresión, la cual es t (160) x l (10600) [mm] del muro:

$$\text{Fuerza } F_a = 0.730 \left(160 * \frac{10600}{10000} \right) \text{ [Ton]}$$

$$\text{Fuerza } F_a = 123.82 \text{ [Ton]} \quad \text{Ecuación 10}$$

Compresión por flexión:

$$F_b = 0.33 f'_m \leq 14 \text{ [Mpa]}$$

$$F_b = 1.42 \text{ [Mpa]} \quad \text{Ecuación 11}$$

Tracción por flexión: La tracción por flexión está definida en la tabla Esfuerzos admisibles para tracción por flexión de la mampostería con aparejo trabado F_t [Mpa] de la (NSR-10, 2010), para morteros de mampostería en dirección perpendicular tanto para la junta horizontal como vertical, de lo que se obtienen los siguientes valores:

F_{th} : Tracción por flexión en la dirección perpendicular a las juntas horizontales

$$F_{th} = 0.17 \text{ [Mpa]} \quad \text{Ecuación 12}$$

F_{tv}: Tracción por flexión en la dirección perpendicular a las juntas verticales

$$F_{tv} = 0.33 \text{ [Mpa]} \quad \text{Ecuación 13}$$

Esfuerzo y fuerza por cortante.

$$F_v = \sqrt{\frac{f'_m}{40}} \leq 0.56 \text{ [Mpa]}$$

$$F_v = 0.05 \text{ [Mpa]} \quad \text{Ecuación 14}$$

Para determinar la fuerza a cortante que resiste el muro se operó el esfuerzo con el área que trabaja a cortante, la cual es t (160) x l (10600) [mm] además de un factor de seguridad j=0.8, así:

$$\text{Fuerza } F_v = 7.03 \text{ [Ton]}$$

De los resultados presentados en este numeral se establece entonces que la resistencia nominal a fuerza axial y cortante de los muros de la casa tipo son respectivamente:

$$\text{Fuerza } F_a = 123.82 \text{ [Ton]}$$

$$\text{Fuerza } F_v = 7.03 \text{ [Ton]}$$

Estos valores son de gran importancia para efectos comparativos entre los valores teóricos y los requerimientos de la normatividad presente.

4.2 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA TEÓRICA CONTRA LA RESISTENCIA SOLICITADA

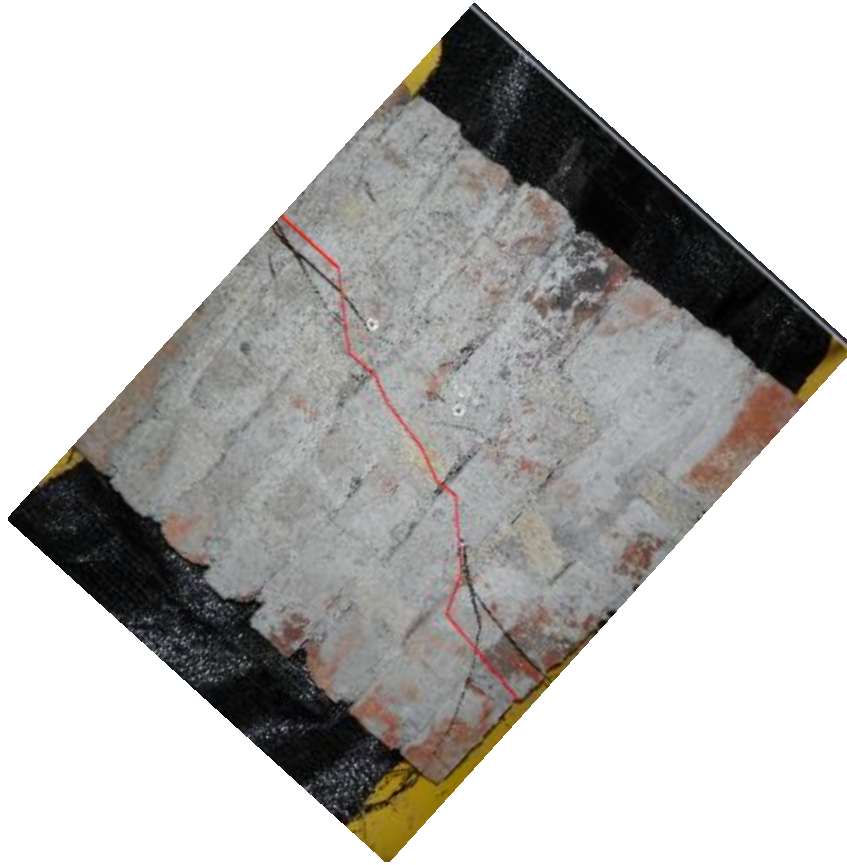
La norma NSR-10, 2010, define como un requisito para las estructuras en mampostería estructural, la resistencia ante cargas horizontales en dos dimensiones.

Los resultados luego de la realización de pruebas contemplada en la norma se encuentra que la resistencia requerida por la fuerza horizontal estática (FHE) es de 552.46 KN; mientras que la resistencia teórica calculada es de 70,3 KN, con lo cual se deduce una alta situación de riesgo cuando este sistema estructural en zonas de alto riesgo sísmico.

4.3 ANÁLISIS DE UN MURETE SOMETIDO A CARGA EN SU DIAGONAL

Cuando a un murete se le somete a esfuerzo ante la presencia de una carga impuesta en una de sus diagonales, lo común es que presente la tendencia a falta de tracción del murete por la separación de la junta mortero. El ángulo de 45° en el que presenta el incremento de esfuerzos es típico de una falla por cortante, siendo de gran importancia la adherencia y fricción presentada entre las juntas de mortero y las unidades. Se presenta además un incremento en los esfuerzos con los puntos de aplicación de la carga a causa del aplastamiento de los bloques en estas zonas en particular.

Figura 6. Falla en el murete por compresión diagonal

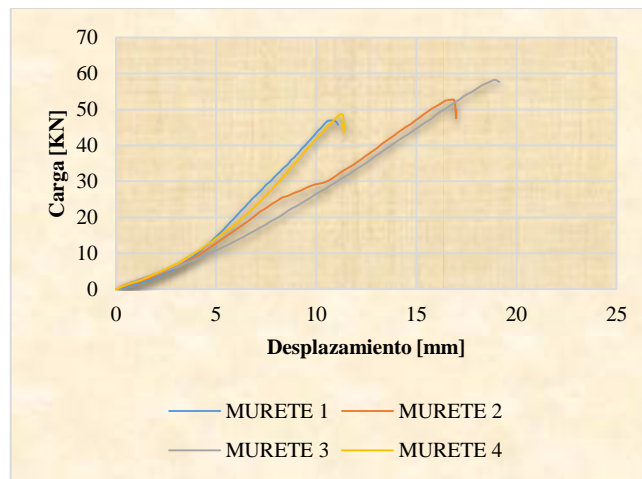


En la figura anterior se observa la falla en el murete, causada por carga en una de sus diagonales; presentándose fractura.

5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

En la figura 7 se presenta los resultados obtenidos a nivel del desplazamiento vertical de los muros, se observa que el murete 3 alcanza el mayor valor de carga.

Figura 7. Curva Carga Vs Desplazamiento vertical



5.1 CURVAS DE DESPLAZAMIENTOS VERTICALES Y HORIZONTALES CONTRA CARGA

Se observa en las figuras 8, 9, 10 y 11 una diferencia significativa entre el desplazamiento horizontal y el vertical de los muretes. Esta diferencia es de un 30% aproximadamente siendo siempre el desplazamiento horizontal mayor que el vertical independientemente del tipo de refuerzo

Figura 8. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 1

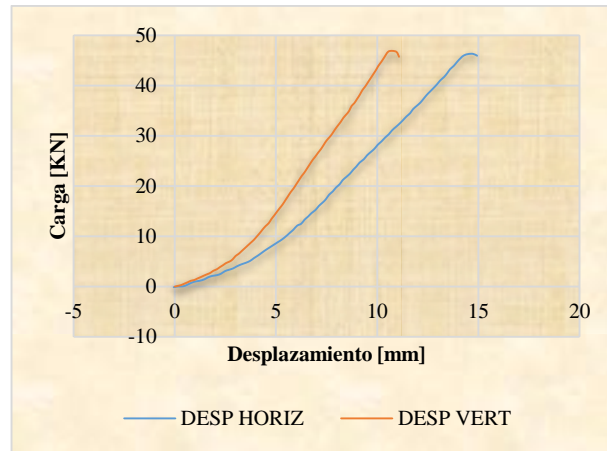


Figura 9. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 2

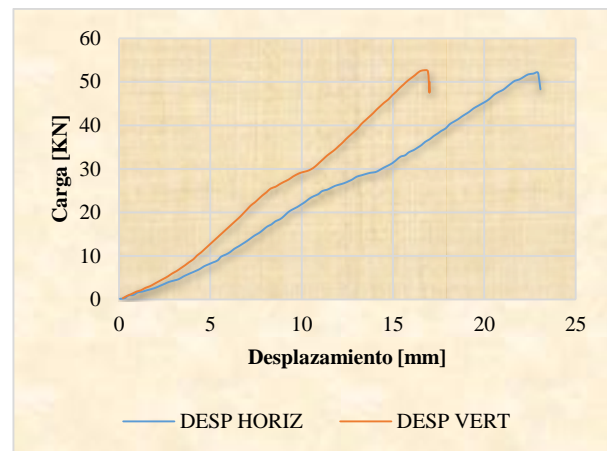


Figura 10. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 3

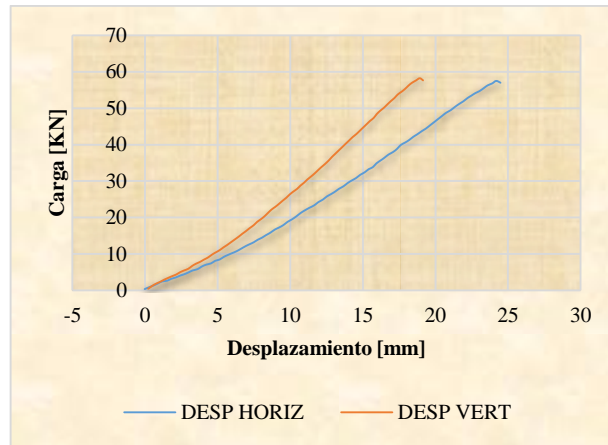
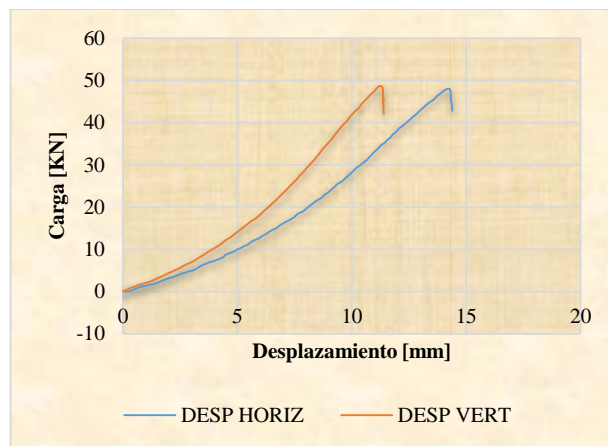


Figura 11. Curva Carga-Desplazamientos en Murete 4



5.2 DETERMINACIÓN DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN CORTANTE PARA LOS MUROS

En esta sección se hace un resumen de las ecuaciones básicas para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones cortantes en muretes 1 a 4.

Esfuerzo cortante máximo (SS).

$$S_s = \frac{0,707 P}{A_n} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

Ss= Esfuerzo Cortante Máximo (MPa) (PSI)

P= Carga Aplicada Máxima (N) (LbF)

A_n = Área Neta de la Muestra

A_N= [(w+h)/2] t n (Ecuación 2)

t=Espesor Total de la Muestra (mm) (in)

n= Por ciento de la superficie total que es sólida, expresado como un decimal.

w=Ancho de la muestra (mm) (in)

h= Altura de la Muestra (mm) (in).

Deformación cortante (γ)

$$\gamma = (\Delta V + \Delta H)/g \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

γ = Deformación Cortante (mm/mm) (in/in)

g = longitud de referencia Vertical (mm) (in)

ΔV = Acortamiento Vertical (mm) (in)

ΔH = Extensión Horizontal (mm) (in)

Módulo de rigidez (G)

$$G = S_s / \gamma \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

γ = Deformación Cortante (mm/mm) (in/in)

Ss= Esfuerzo Cortante Máximo (MPa) (PSI)

G= Modulo de Rigidez (MPa) (Psi)

En la tabla 4 se presentan las dimensiones y parámetros empleados en las ecuaciones 1 a 4.

Tabla 3. Valores usados para la obtención de resultados

W=	500 mm
h=	500 mm
n=	1
AN=	60000 mm ²

5.3 CURVAS ESFUERZO CORTANTE CONTRA DEFORMACIÓN CORTANTE

A partir de la geometría de los muros y de los datos de la sección 4.1 y 4.2 fue posible obtener las curvas esfuerzo d- deformación presentadas en las figura 12, 13, 14 y 15.

Figura 12. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 1

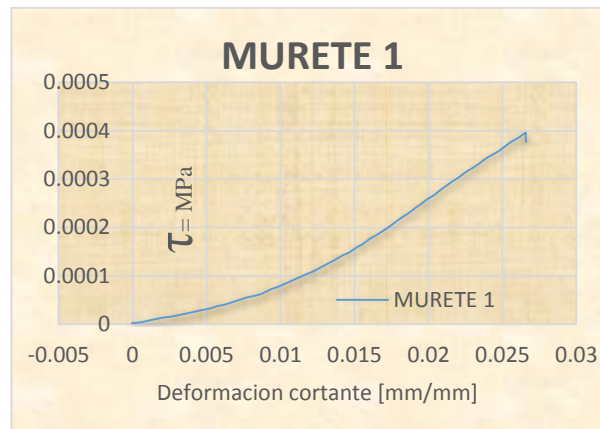


Figura 13. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 2

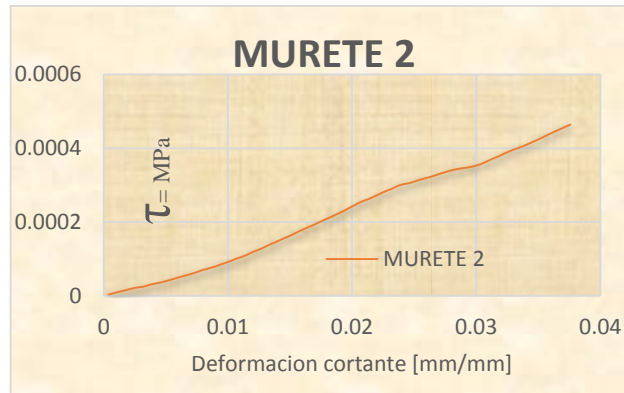


Figura 14. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 3

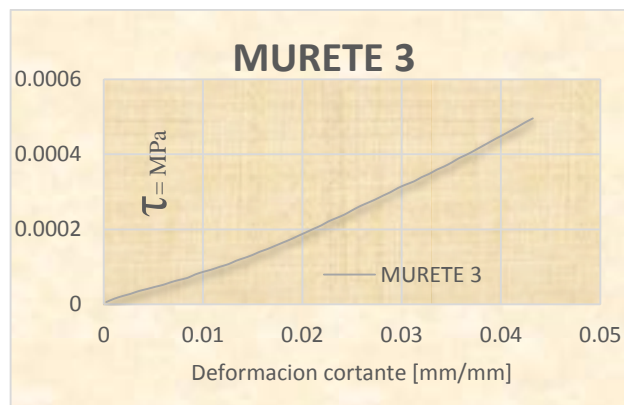
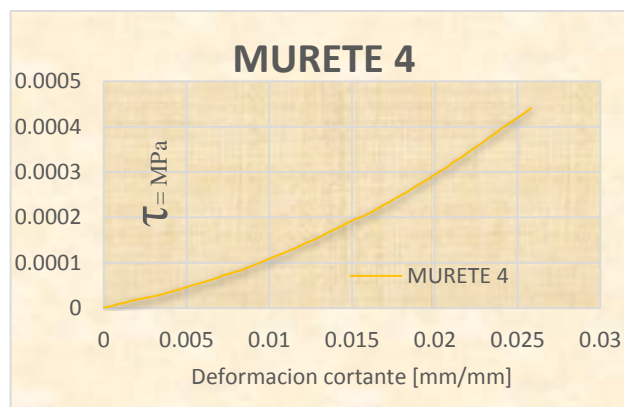


Figura 15. Curva esfuerzo cortante-deformación angular Murete 4



5.4 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE FUERZAS Y ESFUERZOS MÁXIMOS PARA CADA MURETE

En las figuras 12 a 15 se observa la variación de la carga máxima resistida impuesta sobre la diagonal en cada uno de los muretes, en donde se hace evidente que los muretes tipo 3, los cuales contaban un refuerzo con FRP TR3000 con las fibras orientadas a 90°, presentan un aumento considerable en la resistencia máxima, en comparación con los demás tipos de muretes.

En las figuras 12 a 15 se puede observar que existe un aumento de esfuerzo cortante igual a 19.81% (tomando como punto de referencia la muestra sin refuerzo), como se indica en la tabla 5. Adicionalmente se observa una diferencia favorable con el geotextil TR300 cubriendo por completo el murete.

Tabla 4. Esfuerzo cortante según tipo de murete

Muro tipo 1	Muro tipo 2	Muro tipo 3	Muro tipo 4
100%	112,64%	119,81%	104,32%

En la tabla 5 se presenta una comparación del desempeño de los muretes durante el ensayo de tensión diagonal.

Tabla 5. Resultados de laboratorio

RESULTADOS DE LABORATORIO	MURO TIPO 1	MURO TIPO 2	MURO TIPO 3	MURO TIPO 4
CARGA MAXIMA (KN)	46.74	52.65	56	48.76
ESFUERZO A CORTANTE (MPA)	0.550753	0.6203925	0.659866667	0.574555333
DEFORMACION A CORTANTE (mm/r)	11.68143827	17.64287795	19.60532739	11.53034649
MODULO DE RIGIDEZ MPA	0.047147705	0.035163906	0.033657518	0.049829841
DEF. VERTICAL (mm)	11.66	17.61	19.57	11.51
DEF. HORIZONTAL (mm)	15.159	23.248	24.98	14.387
COSTO POR M ² DE MURO (FRP) PES	\$ -	\$ 14,353.77	\$ 18,688.00	\$ 6,134.09

5.5 ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE COSTOS

Teniendo en cuenta los costos del refuerzo y las áreas a reforzar, se obtuvieron los siguientes valores aproximados para el reforzamiento de muros: Muro tipo 2 reforzado con TR 2400 y usando 2.34 m² por reforzamiento sencillo es decir una vuelta, y traslapo de 0.1 m; el valor por m² es de \$ 6134.09 (Valor de lista). Muro tipo 3 el mismo procedimiento pero reforzado con TR 3000 con un uso de geo textil igual en m², pero un costo por m² de \$ 8342.86 (Valor de lista). Muro tipo 3 con tiras de 0.7 cm de ancho en dirección transversal a la diagonal principal y traslapo igual a los ensayos anteriores usando TR 2400 con un uso de este de 1 m².

Costo de geo textil: TR3000= 3'212.000 (por 385 m²) TR2400= 2'833.950 (por 462 m²).

Tabla 5. Control de costos según el tipo refuerzo usado en cada murete.

CONTROL DE COSTOS POR MURETE M ²								
ITEMS	MURETE 1 PRECIO		MURETE 2 PRECIO		MURETE 3 PRECIO		MURETE 4 PRECIO	
LADRILLO T-1	52.00 UND	\$ 350	52.00 UND	\$ 350	52.00 UND	\$ 350	52.00 UND	\$ 350
MORTERO	0.19 M ³	\$ 289,174	0.19 M ³	\$ 289,174	0.19 M ³	\$ 289,174	0.19 M ³	\$ 289,174
M.O MAMPOSTERIA	1.00 M ²	\$ 10,008	1.00 M ²	\$ 12,510	1.00 M ²	\$ 12,510	1.00 M ²	\$ 12,510
GEO TEXTIL	0.00 M ²	0	2.34 M ²	6134.09	2.34 M ²	8342.86	1.00 M ²	6134.09
VALOR FINAL		\$ 83,729		\$ 100,585		\$ 105,753		\$ 92,365

Tabla 6. Comparativo de costos porcentual.

COMPARATIVO PORCENTUAL DE COSTOS			
MURETE 1	MURETE 2	MURETE 3	MURETE 4
100.00%	120.13%	126.30%	90.65%

CONCLUSIONES

- Los muros de mampostería reforzados con FRP, especialmente los que utilizan TR 3000 a 90° , presentan un aumento significativo de la resistencia a cortante del 19.81%, lo cual es muy conveniente y positivo aunque su costo sea mayor, el beneficio es considerable.
- En general, los diferentes tipos de reforzamiento con fibras de FRP, presentan un aumento de la resistencia a cortante, que aumenta en la medida en que se dispongan de mayor espesor de geo textil y su orientación sea perpendicular a su diagonal principal. Los muretes tipo 3 que cuentan con un refuerzo con FRP TR 3000 y fibras orientadas a 90° , presentan un mayor aumento de la resistencia que los otros tipos de muretes, en todos los casos igualmente se observó que los desplazamientos horizontales fueron mayores que los verticales.
- Cabe resaltar que no solo se puede usar geo textiles en muros de mampostería para incrementar la capacidad a cortante, se pueden usar para dar estabilidad ante la caída inminente de muros de mampostería a causa de un sismo o una fuerza externa. Se evitaría la caída de material parcial o total mitigando daños mayores con su caída. Puede ser aplicado en antepechos y muros de fachada elaborados en mampostería de edificaciones de gran altura sin afectar su arquitectura ni acabado.
- Desde el punto de vista cualitativo, las mallas de fibra de FRP utilizadas en el reforzamiento de muros de mampostería son una opción accesible y conveniente para la construcción, además de ofrecer beneficios estéticos y de seguridad en las edificaciones.
- En cuanto a la determinación de la resistencia cortante de muros de mampostería reforzados con FRP se destaca el aumento significativo que se obtuvo al usar

geotextiles Esto se denota claramente en las figuras 11 a 14 respectivamente, se denota un aumento de la resistencia a cortante. El estudio anterior evidencia la realización del objetivo general del proyecto.

- La determinación, en forma experimental, de la relación carga-desplazamiento en muros de mampostería reforzados con geotextil se evidencia en la gráfica 6 del presente artículo con la cual se da por cumplido el primer objetivo específico (Determinar en forma experimental la relación carga-desplazamiento en muros de mampostería reforzados con FRP) y a su vez el objetivo específico numero dos (Realizar ensayos de laboratorio que permitan determinar el comportamiento del muro, con distintas configuraciones de refuerzo usando FRP).
- La resistencia obtenida con la presencia o ausencia de geotextil y el calibre usado referencian una conexión directa con los resultados obtenidos, al ser mayores las resistencias al aumentar el calibre del refuerzo.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] JA Chiquillo, F Patiño, Contribución al estudio de la respuesta última de muros de mampostería. Bucaramanga, tesis de grado, 2011.
- [2] PAVCO. Geotextiles tejidos. Disponible en pavco.com.co/refuerzos
- [3] J López; S Ollers, E Oñate. Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos. 1998.
- [4] IL Martínez. Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas. Madrid: Tesis Doctoral, UPM. 2003.
- [5] D Páez, S Parra, C Montaña. Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería. En: Rev. Universidad de Medellín, vol. 8, No. 14.
- [6] NSR-10. Mampostería estructural. Unidades de Mampostería. Bogotá, D.C., 2010.
- [7] NTC-4017. Métodos para muestreo y ensayo de unidades de mampostería y otros productos de arcilla, ICONTEC. Bogotá, D.C., 2005.
- [8] NTCM. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructura en mampostería. 2004.

BIBLIOGRAFÍA

D Páez, S Parra, C Montaña. Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mampostería. En: Rev. Universidad de Medellín, vol. 8, No. 14.

IL Martínez. Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas. Madrid: Tesis Doctoral, UPM. 2003.

JA Chiquillo, F Patiño, Contribución al estudio de la respuesta última de muros de mampostería. Bucaramanga, tesis de grado, 2011.

J López; S Ollers, E Oñate. Cálculo del comportamiento de la mampostería mediante elementos finitos. 1998.

NTC-4017. Métodos para muestreo y ensayo de unidades de mampostería y otros productos de arcilla, ICONTEC. Bogotá, D.C., 2005.

NTCM. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructura en mampostería. 2004.

NSR-10. Mampostería estructural. Unidades de Mampostería. Bogotá, D.C., 2010.

PAVCO. Geotextiles tejidos. Disponible en pavco.com.co/refuerzos