



Influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP ante cargas fuera del plano.

Jairo Arley Urbina Gómez

Escuela Colombiana de Ingeniería
Posgrado en Ingeniería Civil
Bogotá, Colombia
2020

Influencia de la longitud de traslape en el comportamiento a flexión de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP ante cargas fuera del plano.

Jairo Arley Urbina Gómez

Tesis presentada como requisito para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Director (a):

Ph.D. Nancy Torres Castellanos

Codirector (a):

Ph.D. Gustavo Tumialán

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Posgrado en Ingeniería Civil

Bogotá, Colombia

2020

La tesis de maestría titulada “Influencia de la longitud de traslapo en el comportamiento a flexión de muros de mampostería reforzados con barras de GFRP ante cargas fuera del plano”, presentada por Jairo Arley Urbina Gómez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural.

Ing. Nancy Torres Castellanos, Ph.D

Directora de la tesis

Ing. Jaime Garzón

Jurado

Ing. Carlos Palomino, Msc

Jurado

Bogotá, D.C., _____ de 2020

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo se lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y un privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que hacen parte de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de su establecimiento educativo.

De igual manera mis agradecimientos a toda la Facultad de Ingeniería, a mis profesores quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento a la Ing. Nancy Torres, principal colaboradora durante todo este proceso, quien, con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

Resumen

Recientes avances en el campo de los materiales poliméricos reforzados con fibras (FRP) han dado como resultado el desarrollo de nuevas aplicaciones con excelentes potenciales para el refuerzo de elementos de concreto en áreas donde el acero no ha mostrado su mejor desempeño, como es el caso de la corrosión, cuando no se toman las medidas adecuadas para protegerlo y se encuentra expuesto a ambientes severos. Unos de estos materiales son los polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP), aramida (AFRP) y vidrio (GFRP)[1]. Una de las principales aplicaciones hasta el momento, son las barras de FRP, utilizándose como armadura interna del concreto, donde ya se tienen normativas de diseño ante diferentes solicitaciones como lo son las guías ACI 440 de Estados Unidos y las guías CSA-S806 de Canadá; los requisitos de análisis y diseño que contienen estas guías han sido resultado de diferentes investigaciones desarrolladas en este campo; otro es el caso de la mampostería reforzada internamente con barras de FRP, donde son escasas las investigaciones en este campo.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo se presenta una investigación llevada a cabo para determinar la influencia de la longitud de traslapo en la capacidad de los muros de mampostería de concreto reforzado internamente con barras de GFRP, trabajando bajo cargas fuera del plano, la necesidad de realizar esta investigación surge como complemento de las investigaciones ya realizadas en el Centro de Estudios de Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería, relacionadas con el comportamiento de muros de mampostería, pero como se menciona ya en este proyecto, enfocado en evaluar diferentes longitudes de traslapo, partiendo de una longitud de traslapo teórica, calculada siguiendo la ecuación especificada para barras de FRP embebidas en concreto y validada experimentalmente en especímenes a escala real.

Para evaluar la capacidad a flexión fuera del plano de los muros de mampostería, manteniendo una longitud y altura constante, variando el diámetro de barra de refuerzo y la resistencia a compresión de la mampostería; se construyeron una serie de muros que se reforzaron internamente con barras de GFRP longitudinales usando diferentes longitudes de traslapo, las celdas en las que se instaló la barra se rellenó con “grout” y fueron ensayados después de 28 días, aplicando carga en los tercios buscando de esta manera un comportamiento de flexión pura en el tercio central.

Se obtuvieron resultados experimentales que se compararon con los resultados esperados (teóricos) los cuales fueron calculados implementando la metodología de cálculo de capacidad a flexión fuera del plano desarrollada en estudios previos en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Con base en los resultados, se concluye que las longitudes de traslapo usadas en los muros mostraron un buen comportamiento ya que no afectó la capacidad de los muros sino por el contrario, se notó en algunos casos un ligero aumento en su capacidad respecto a los muros ensayados que estaban reforzados con barras de GFRP continuas; por lo tanto, las ecuaciones del ACI 440.1R usadas para el cálculo de la longitud de traslapo se pueden implementar ya que su capacidad ante la sollicitación experimental en estudio respecto a la teórica es similar o ligeramente mayor.

Palabras clave: GFRP, Mampostería, Flexión, Traslado.

Abstract

Recent advances in the field of fiber-reinforced polymeric materials (FRP) have resulted in the development of new applications with excellent potentials for reinforcing reinforced concrete elements in areas where steel has not demonstrated its best performance, such as In the case of corrosion, when adequate measures are not taken to protect it and it is exposed to severe environments. Some of these materials are carbon fiber reinforced polymers (CFRP), aramid (AFRP) and glass (GFRP). [1] One of the main applications of use so far is its use as internal reinforcement for concrete, where they already have design standards for different applications, such as the ACI 440 guides in the United States and the CSA-S806 guides in Canada.

Taking into account the aforementioned, this paper presents an investigation carried out to determine the influence of the overlap length on the capacity of internally reinforced concrete masonry walls with GFRP bars, working under out-of-plane loads , the need to carry out this research arises as a complement to the research already carried out at the Center for the Study of Structures and Materials of the Colombian School of Engineering, related to the behavior of masonry walls, but as mentioned and focused on evaluating different Overlap lengths framed within an initial theoretical length and experimentally contrasted in full-scale specimens.

To evaluate the out-of-plane bending capacity of masonry walls, maintaining a constant length and height, varying the diameter of the reinforcing bar and the compressive strength of the masonry; a series of walls were built that were internally reinforced with GFRP bars using different overlap lengths, the segments in which the bar was installed were filled with "grout" and were tested by applying load on the thirds looking for a behavior of pure flex in the central third.

Experimental results were obtained that were compared with the expected (theoretical) results which were calculated by implementing the out-of-plane flexural capacity calculation

methodology developed in previous studies at the Julio Garavito Colombian School of Engineering. Based on the results, it is concluded that the overlap lengths used in the walls showed a good performance since it did not affect the capacity of the walls but on the contrary, a slight increase in their capacity was noted in relation to the walls assays that were reinforced with continuous GFRP bars; therefore, the ACI 440.1R equations used to calculate the overlap length can be implemented since their experimental behavior compared to the theoretical one is similar or slightly higher.

Keywords: GFRP, Masonry, Flexural, Splice.

Contenido

	Pág.
1. Marco Teórico.....	22
1.1 Bloque de concreto	22
1.2 Mortero de pega.....	23
1.3 Mortero de relleno “Grout”.....	23
1.4 Refuerzo de FRP	25
1.5 Consideraciones de análisis y diseño	27
1.5.1 Cuantía balanceada y modo de falla	29
1.5.2 Profundidad del eje neutro.....	29
1.5.3 Deformación unitaria en la barra.....	30
1.5.4 Momento resistente nominal.....	30
1.5.5 Carga de falla	30
1.5.6 Momento de agrietamiento	31
1.5.7 Deflexiones máximas en el muro.....	32
1.5.8 Cálculo de la longitud de traslapo.....	32
2. Estado del arte.....	34
2.1 Comportamiento Ante Carga Perpendicular al Plano, de Muros de Mampostería en Concreto, Reforzados con Barras de FRP.....	34
2.2 Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP.....	38
3. Objetivos.....	41
3.1. Objetivo general.....	41
3.2 Objetivos específicos	41
4. Programa experimental.....	42
4.1 Metodología	42
4.2 Variables estudiadas.....	42
4.3 Descripción de los materiales	42
4.3.1 Mortero de pega	43
4.3.2 Mortero de relleno	43
4.3.3 Mampostería de concreto	43
4.3.4 Barras de GFRP.....	43
4.4 Configuración de los especímenes	44
4.5 Cálculo de la capacidad resistente de los muros.....	45
4.6 Cálculo de la longitud de traslapo	48

4.7 Disposición del refuerzo en los muros.....	50
4.8 Elaboración de muros	52
4.8.1 Caracterización de los materiales.....	52
4.8.2 Mortero de pega	52
4.8.3 Mortero de relleno	52
4.8.4 Mampostería de concreto	53
4.8.5 Barras de GFRP.....	55
4.8.6 Proceso constructivo	56
4.9 Montaje para los ensayos	60
4.10 Instrumentación de los muros	62
4.11 Protocolo de carga.....	64
5. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	65
5.1 Resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio	65
5.2 Análisis de resultados	73
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
6.1 Conclusiones	77
6.2 Recomendaciones	78
7. ANEXOS.....	79
8. Bibliografía	96

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1-1</i> Curva Esfuerzo vs Deformación del FRP con diferentes materiales [9]	27
<i>Figura 2-1:</i> Configuración geométrica muros (cm) [5]	35
<i>Figura 2-2:</i> Configuración del refuerzo de los muros [5]	36
<i>Figura 2-3:</i> Vista general del montaje [5]	37
<i>Figura 2-4:</i> Estado final elementos del muro después de ensayos [5]	37
<i>Figura 2-5:</i> Configuración de los muros [4]	39
<i>Figura 2-6:</i> Configuración dimensional y de refuerzo de los muros [4].....	39
<i>Figura 2-7:</i> Carga aplicada al muro M1-G [4].....	40
<i>Figura 4-1</i> Características del bloque de concreto usado	43
<i>Figura 4-2</i> Ubicación de las barras en las dovelas del muro.....	44
<i>Figura 4-3</i> Geometría de los muros	45
<i>Figura 4-4</i> Muros con barras continuas	51
<i>Figura 4-5</i> Muros con barras traslapadas	51
<i>Figura 4-6</i> Refuerzo viga de apoyo de los muros	56
<i>Figura 4-7</i> Montaje para ensayos	60
<i>Figura 4-8</i> Instrumentación externa del muro	62

Lista de fotografías

	Pág.
Fotografía 1-1 Bloque de concreto	22
Fotografía 1-2 Uso de barras de FRP como refuerzo interno de mampostería de concreto	24
Fotografía 1-3 Uso de barras de FRP como refuerzo interno de mampostería de concreto	25
Fotografía 4-1 Elaboración del mortero de pega.....	52
Fotografía 4-2 Elaboración del grout de relleno para muros de mampostería de concreto	53
Fotografía 4-3 Elaboración cilindros de grout de relleno.....	53
Fotografía 4-4 Elaboración de muretes de mampostería	54
Fotografía 4-5 Montaje y ensayo de los muretes de mampostería.....	54
Fotografía 4-6 Barras de GFRP usadas	55
Fotografía 4-7 Elaboración de muro de mampostería de concreto	57
Fotografía 4-8 Traslapo de barra de GFRP	57
Fotografía 4-9 Instalación de la barra de GFRP en la celda	58
Fotografía 4-10 Instalación del grout de relleno de las celdas	58
Fotografía 4-11 Vibrado para eliminar acumulación de aire en el grout	59
Fotografía 4-12 Almacenamiento de muros ya construidos	59
Fotografía 4-13 Transporte de muro para ensayo	61
Fotografía 4-14 Montaje de muro en el marco	61
Fotografías 4-15 Instrumentación de muro para ensayo.....	64
Fotografía 5-1 Sistema de gato hidráulico	65
Fotografía 5-2 Equipo de almacenamiento de datos.....	66
Fotografía 5-3 Falla a Compresión muro 4-1500-C-T-1,15-B.....	70
Fotografía 5-4 Falla a Compresión muro 5-1500-C-T-1,18 -B.....	71
Fotografía 5-5 Falla a Compresión muro 5-2500-C-T-1,23- A.....	71
Fotografía 5-6 Falla a Tensión muro 5-2500-C-T-1,23- B.....	72
Fotografía 5-7 Falla del mortero de pega en la cara a Tensión del muro 1500-C-T-1,18- A.	72

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Propiedades mecánicas típicas de las fibras Utilizadas para las barras de FRP	26
Tabla 1-2 Módulo de ruptura f_r [10]	31
Tabla 2-1: Resumen de los muros del programa experimental [5]	36
Tabla 2-2: Resumen de muros del programa experimental [4]	38
Tabla 4-1 Identificación de muros de prueba y características del refuerzo	44
Tabla 4-2 Capacidad Teórica de los muros	48
Tabla 4-3 Cálculo de las longitudes de traslapo iniciales	50
<i>Tabla 4-4</i> Muros del programa experimental	50
<i>Tabla 4-5</i> Ensayos para caracterizar los materiales	55
Tabla 5-1 Resultados de los ensayos	67
Tabla 5-2 Relación entre Capacidad Teórica y Capacidad Experimental de los Muros, Deflexiones esperadas y experimentales de los muros.	73

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A_b	Área de la barra	mm ²
A_f	Área del refuerzo	mm ²
b	Ancho del muro	mm
c	Profundidad del eje neutro del muro	mm
d	Profundidad efectiva del muro	mm
E_m	Módulo de elasticidad mampostería	MPa
F_{fu}	Resistencia a la rotura barra FRP	MPa
E_f	Módulo de elasticidad barra FRP	MPa
f'_m	Resistencia a la compresión de la mampostería	MPa
f'_{cp}	Resistencia a la compresión mortero de pega	MPa
f'_{cr}	Resistencia a la compresión mortero de relleno	MPa
f_r	Módulo de rotura	MPa
F_y	Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo	MPa
I_{cr}	Inercia de la sección agrietada del muro	mm ⁴
I_g	Inercia del muro	mm ⁴
l_d	Longitud de traslapo barras GFRP	m
l_e	Longitud embebida de la barra de GFRP	m
L	Altura del muro	mm
M_n	Momento de resistencia nominal	kN-m
M_{cr}	Momento de agrietamiento	kN-m
n	Relación modular	MPa/MPa
L_b	Longitud de la barra	mm
P	Fuerza de falla en los muros	kN
P_{cr}	Fuerza de agrietamiento	kN
S	Módulo elástico de la sección transversal del muro	Mm ² -m
t	Espesor del muro	mm

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
α_l	Relación del promedio de esfuerzos del bloque de compresiones TMS 402-16	
β_l	Factor para calcular la altura del bloque	
δ	Deflexión máxima	mm
ε_{fu}	Deformación unitaria de las barras de FRP	mm/mm
ε_{mu}	Deformación unitaria de la mampostería	mm/mm
ϕ_d	Diámetro de la barra	mm
ϕ	Coefficiente de reducción de resistencia	
ρ_b	Cuantía de refuerzo balanceada	mm/mm
ρ	Cuantía de refuerzo del muro	mm/mm

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ECI	Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
NSR	Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente
NTC	Norma Técnica Colombiana
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
TMS	The Mansory Society

Introducción

En Colombia y otros países del mundo, la mampostería es uno de los sistemas estructurales más usados; por lo general en edificaciones multifamiliares de vivienda de diferentes alturas, o en algunos casos como muros de contención o de cerramiento. El sistema de Mampostería estructural ofrece grandes ventajas como lo es su disminución en costo frente a estructuras convencionales de pórticos, dado que tienen menos alturas de acabados, no se necesita formaleta y por lo general se cuenta con mano de obra especializada económica a nivel Latinoamérica.

Para la construcción de los muros, comúnmente se utiliza unidades cerámicas o unidades de concreto de perforación vertical; donde a través de sus celdas se coloca el acero convencional de refuerzo. Sin embargo, en algunos casos al estar estas estructuras expuestas a ambientes agresivos, el acero tiende a sufrir problemas de corrosión, ocasionando la pérdida de sección lo cual genera una pérdida de capacidad portante y por lo tanto, se afecta directamente la integridad estructural[2]. Otro caso muy diferente es el de las clínicas y centros médicos de atención donde se realizan estudios especializados de resonancias y se necesita aislar los equipos de elementos estructurales reforzados con acero convencional para que no presenten interferencia con los registros y se necesita explorar nuevas opciones de materiales de baja conductividad eléctrica que no genere interferencias. Por estas razones gracias al desarrollo de materiales y tecnologías que se ha dado en los últimos años, se ha contribuido a solucionar algunos de estos problemas y también se han podido mejorar las técnicas tradicionales utilizadas en la industria de la construcción y contar con materiales más durables.

En los últimos años, se han implementado en la industria de la construcción materiales compuestos cuyo refuerzo se compone de fibras y se encuentran recubiertos por resinas

poliméricas, dichos materiales son conocidos como polímeros reforzados con fibra (“FRP” por sus siglas en inglés). El FRP, Inicialmente fue un material utilizado por la industria aeroespacial y militar, pero en los últimos años se ha convertido en un material que cada día está más presente en los elementos que utilizamos a diario, como partes de carros, elementos deportivos, accesorios tecnológicos, entre otros. También en la construcción ofrece facilidades para restaurar, repotenciar, reforzar y reparar estructuras existentes, así como también para utilizarlo en estructuras nuevas.[3]

Los materiales mencionados anteriormente tienen altas resistencias a la corrosión, adicionalmente no presentan reacciones en zonas donde la estructura está expuesta a ambientes muy agresivos que generan especialmente corrosión y sus propiedades físicas y mecánicas son suficientemente atractivas para el sector de la construcción al presentar alta resistencia a la tensión, baja densidad y conductividad eléctrica.

No obstante, se debe reconocer que estos materiales tienen un comportamiento frágil, lo cual no es ideal para para estructuras sismo-resistente en las cuales la filosofía se basa en el diseño de estructuras dúctiles. En cuanto a la normatividad actual de este material y su uso, ya se puede encontrar la guía de diseño americana ACI 440.1R-15 “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars”, la cual contiene las recomendaciones para el análisis y diseño de estructuras nuevas en concreto con refuerzo interno en barras de FRP y la normatividad canadiense CSA-S806 “Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers”, que cubre los requisitos generales de diseño por estados límite, las propiedades de los componentes de FRP y el diseño de elementos de concreto con refuerzo interno de barras de FRP.

Por otro lado, existen las normas estadounidenses TMS 402-13 / ACI 530-13 / ASCE 5-13, que son actualmente los códigos de análisis y diseño estructural de mampostería y cubren generalmente la mampostería reforzada con acero convencional, de igual manera en Colombia los requisitos de diseño de mampostería reforzada internamente con barras de acero se especifican en el título D del Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes Título D, NSR-10.

En relación con el estudio del comportamiento de muros reforzados internamente con barras de FRP expuestos a diferentes solicitaciones, a nivel mundial apenas se están

dando los primeros pasos para generar ecuaciones que permitan determinar la capacidad teórica; en Colombia, específicamente en la escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, ya se han adelantado diferentes investigaciones [4][5], donde se han propuesto algunas ecuaciones para determinar su capacidad principalmente ante cargas fuera del plano y que han sido validados experimentalmente, obteniéndose excelentes aproximaciones; a su vez, en los estudios que se han desarrollado, se ha generado una serie de incertidumbres relacionadas principalmente con la longitud que debe colocarse de traslapo en las barras embebidas en las celdas de los muros.

Actualmente, los códigos definen ecuaciones para calcular la longitud de traslapo para el acero de refuerzo, y para las barras de FRP en elementos de concreto; pero no se encuentran ecuaciones especificadas para las barras de FRP embebidas en muros en mampostería. Por lo tanto; en búsqueda del planteamiento de una ecuación que permitiera determinar la longitud de traslapo de las barras de FRP, actuando como refuerzo interno de la mampostería, cuando esta se somete a cargas fuera del plano; se tomó como base las investigaciones desarrolladas anteriormente por la directora del presente proyecto en las cuales se evaluó experimentalmente el comportamiento de muros de mampostería reforzada con barras de GFRP continuas ante la sollicitación de carga fuera del plano, y donde se plantearon las ecuaciones que permitían evaluar la capacidad teórica de los muros de mampostería.

Basados en estas capacidades teóricas y la excelente correlación que han presentado con los resultados de los ensayos experimentales, se realizó el presente proyecto donde se evaluó experimentalmente una serie de muros con diferentes longitudes de traslapo de refuerzo y validaron mediante las ecuaciones ya propuestas su capacidad y comportamiento.

En primera instancia, se tuvieron en cuenta las disposiciones establecidas en el ACI 440 [6] con estas disposiciones y teniendo en cuenta el diámetro de la barra, se establecieron las longitudes de traslapo de las barras de GFRP a usar en los muros.

Las variables definidas en la etapa experimental fueron: cuantía de refuerzo, la longitud de traslapo en barras # 4 y # 5 y adicionalmente se verificó el efecto de tener la barra

desplazada en el muro; para evaluar este efecto, se ensayaron muros con barras de refuerzo ubicadas a 2 pulgadas de la cara exterior del bloque, determinando así la influencia que genera tener la barra desviada del eje central de la dovela hacia la cara a tensión.

1. Marco Teórico

La mampostería estructural es un sistema compuesto por bloques de concreto u otros materiales que conforman sistemas monolíticos que pueden resistir cargas de gravedad, sismo y viento. Este sistema está básicamente fundamentado en la construcción de unidades típicamente de perforación vertical instaladas de manera manual, reforzadas internamente con acero estructural y alambres de amarre en los traslapes de las barras, donde las celdas que contienen el refuerzo se rellenan con mortero de relleno. El análisis y diseño de este tipo de mampostería, debe cumplir con todas las especificaciones propuestas en el Título D de la NSR – 10, como normativa colombiana; a nivel internacional su diseño se rige de acuerdo con el ACI y al TMS.

A continuación, se describirán los materiales que componen la mampostería estructural tradicional.

1.1 Bloque de concreto

El bloque de concreto es un material prefabricado que funcionan en conjunto al unirse con mortero de pega formado generalmente por cemento, arena y agua.

Fotografía 1-1 Bloque de concreto



1.2 Mortero de pega

El mortero es una mezcla homogénea de material cementante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena) y agua; en algunas ocasiones dependiendo de su uso se pueden añadir aditivos.

Los morteros de cemento son los más empleados en Colombia, se componen de arena y cemento Portland, los cuales dependiendo de su dosificación puede presentar altas resistencias y sus condiciones de trabajabilidad son variables de acuerdo con la proporción de cemento y arena usados.

Los morteros se clasifican como H, M, S o N – el mortero tipo N solo se permite en sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico [7] y deben cumplir la NTC 3329.

Según las indicaciones de la NTC 3546 para medir la resistencia a la compresión a los 28 días, se usan cubos de 50 mm de lado o cilindros de 75 mm de diámetro por 150 mm de altura. En la NTC 111 y 4050 se indican los ensayos de flujo y retención de agua.

1.3 Mortero de relleno “Grout”

Es una mezcla que contiene cemento, agregados seleccionados y aditivos para otorgar una alta resistencia y fluidez que facilita su colocación, está formulado especialmente para realizar el llenado de celdas o dovelas en mampostería estructural.[8]

Está compuesto por cemento Portland Tipo I, II o III, que debe cumplir con las NTC 121 la cual rige la calidad del cemento en Colombia y NTC 321 que define las especificaciones químicas del cemento Portland, cal tipo S que debe cumplir con la NTC 4019 que establece las especificaciones para la cal hidratada para usos en mampostería, agregados que deben cumplir con la NTC 4020 que establece los agregados para el mortero de relleno en mampostería y aditivos que deben cumplir con la NTC 1299 que comprende los materiales que se usan como aditivos químicos.

La mampostería estructural como ya se mencionó, se compone de los materiales descritos anteriormente que unidos conforman un sistema monolítico que puede ser reforzado internamente con barras de GFRP y de esta manera presentar una alternativa viable, principalmente para aquellas edificaciones que pueden estar sometidas a ambientes agresivos, brindando una adecuada capacidad y durabilidad.

En años recientes, se ha implementado con éxito para el reforzamiento y/o restauración estructural de elementos, la tecnología de los polímeros reforzados con fibra; la cual se ha desarrollado continuamente desde hace algunos años y actualmente, las casas productoras de este material cuentan con distintas presentaciones factibles económicamente en cuanto al uso en distintas industrias, incluida la industria de la construcción.

Específicamente, en el área de los elementos estructurales de concreto reforzado, se presentan las barras de FRP; que permiten reforzar internamente el concreto; donde ya se han desarrollado diversas investigaciones y existen guías y procedimientos de diseño. En el caso de la mampostería, aún no existen guías de análisis y diseño de muros reforzados internamente con barras de FRP, pero dado el auge y las ventajas que se han visto de estos materiales compuestos, ya se ha implementado su uso en la construcción de nuevas edificaciones, principalmente en áreas costeras como se puede observar en la **Fotografía 1-2** y **Fotografía 1-3**.



Fotografía 1-2 Uso de barras de FRP como refuerzo interno de mampostería de concreto



Fotografía 1-3 Uso de barras de FRP como refuerzo interno de mampostería de concreto

1.4 Refuerzo de FRP

Las barras de refuerzo de FRP, son polímeros reforzados con fibras que pueden ser de vidrio, carbono o aramida. Las fibras dan el refuerzo mecánico y por medio de la resina se mantiene unido el conjunto, además de las propiedades físicas finales al elemento, las protegen de daño ambiental y mecánico. En ocasiones se les añaden aditivos para mejorar o adicionar sus propiedades específicas. La fracción de fibra y volumen afecta significativamente la resistencia y la rigidez del FRP, mientras que el tipo de resina afecta el mecanismo de falla y la resistencia a la fractura. Una barra de FRP es anisotrópica, donde los factores que influyen en las propiedades de la barra son la orientación de la fibra, la velocidad de curado de la resina, el proceso de fabricación y el control de calidad durante la fabricación.[2]

Las barras de FRP son aproximadamente 5 veces más livianas que el acero de refuerzo y esto se debe a que presentan una menor densidad – 1.27 t/m^3 a 2.4 t/m^3 – lo que origina una disminución en las cargas de transporte, menores costos por mano de obra. Y menor carga sobre la cimentación, dado que se reduce el peso de la estructura. El coeficiente de expansión térmica en sentido longitudinal depende de la fibra, mientras que transversalmente depende de la resina; este coeficiente, es considerablemente bajo en comparación con el acero de refuerzo. Las fibras de vidrio (GFRP) tienen como principal

ventaja su bajo costo sin embargo son menos resistentes que otros tipos de fibras. En la siguiente tabla se presentan las propiedades mecánicas de los tipos más comunes de fibras usadas para elaborar las barras de FRP.

Tabla 1-1 Propiedades mecánicas típicas de las fibras Utilizadas para las barras de FRP

Material	Modulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación última a la tensión (%)
Carbono			
Alta resistencia	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Ultra alta resistencia	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Ultra alto módulo	500-700	2100-2400	0,2-0,4
Vidrio			
E	70	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
Aramida			
Bajo módulo	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Alto módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5

Para comprender con mayor facilidad las diferencias en resistencia y comportamiento que se obtiene con las barras de polímeros reforzados con fibras, la **Figura 1-1** compara las curvas esfuerzo-deformación de materiales FRP fabricados con los tres tipos de fibras previamente expuestas y la curva típica del acero estructural. Es evidente la gran resistencia que ofrece los materiales FRP a base de fibras de carbono (CRFP) en comparación con materiales a base de fibras de aramida o de vidrio y el mismo acero estructural [9], como se puede observar en la gráfica, el GFRP aunque tenga menor módulo de elasticidad, presenta mayor resistencia respecto al acero y grandes deformaciones que pueden ser similares si se comparan con las del acero pero con la diferencia de que este material desarrolla estas deformaciones en el rango elástico.

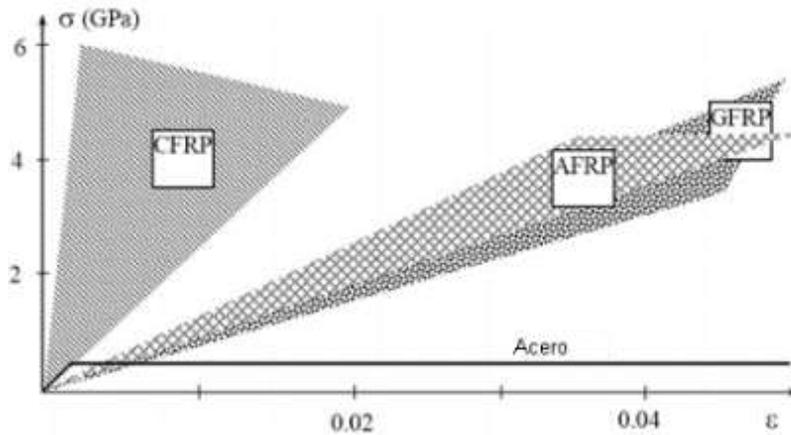


Figura 1-1 Curva Esfuerzo vs Deformación del FRP con diferentes materiales [9]

Dado que ya se han construido algunas viviendas en zonas costeras en mampostería reforzada internamente con barras de FRP y que no existe aún un procedimiento de diseño definido, lo cual ha generado incertidumbre relacionada con el comportamiento de este sistema, en la escuela Colombiana de Ingeniería se han desarrollado diferentes investigaciones donde desarrolló un procedimiento teórico para estimar la capacidad de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP, sometidos a cargas fuera del plano. Se tuvo en cuenta para el desarrollo del procedimiento la metodología de diseño de estructuras de concreto reforzadas con barras de FRP que está estipulado en el documento ACI 440.1R-15, combinado con los requerimientos y especificaciones para mampostería estructural que se presentan en el TMS 402-16, que ofrece los requisitos mínimos para el diseño y construcción de mampostería nueva reforzada con barras de acero.

A continuación, se presentan las consideraciones de análisis y diseño con las cuales se han implementado las ecuaciones para determinar la capacidad teórica de los muros de mampostería reforzada internamente con barras de FRP, validadas experimentalmente en varios proyectos de investigación del área de la maestría en Ingeniería estructural.

1.5 Consideraciones de análisis y diseño

Con el fin de unir los criterios de las dos guías de diseño estipuladas y poder predecir la capacidad de la mampostería solicitada ante cargas fuera del plano, tomando lo necesario

de cada uno de estos documentos, se puede calcular analíticamente las capacidades de los muros sometidos a cargas fuera del plano, esto fue plenamente validado en los proyectos realizados por el Ing. Daniel Otalora [5] y por el Ing. Luis Quintana [4]. Para el cálculo analítico de las capacidades de los muros de mampostería reforzados con barras de FRP, se evalúa: la cuantía balanceada, el modo de falla esperado, la deformación unitaria en las barras, el momento resistente nominal, la carga de falla esperada, el momento de agrietamiento esperado y las deflexiones máximas esperadas en el muro.

El planteamiento de estas ecuaciones se basa en el método de estado límite de resistencia. La sollicitación que se presente en el muro estructural debe ser menor o igual a su capacidad nominal multiplicada por el coeficiente de reducción de resistencia (ϕ). El diseño de mampostería estructural por el método de estados límites de resistencia se basa en las siguientes suposiciones [7]:

- La mampostería no resiste esfuerzos de tensión.
- El refuerzo está totalmente rodeado por el “grout” de relleno que va dentro de las cavidades verticales, de tal manera que junto con las piezas de mampostería trabajen como un material homogéneo.
- Las deformaciones unitarias en el refuerzo y en la mampostería deben suponerse proporcionales a la distancia al eje neutro de la sección. Las resistencias nominales de las secciones de muros de mampostería para condiciones de flexo-compresión se deben obtener de la aplicación de los principios de equilibrio y compatibilidad de deformaciones – Las secciones planas permanecen planas –
- Los esfuerzos en el acero para valores menores que el esfuerzo de fluencia, deben considerarse linealmente proporcionales a la deformación unitaria multiplicada por el módulo de elasticidad. Para valores superiores de deformación unitaria correspondiente al esfuerzo de fluencia, el esfuerzo en el acero se debe considerar independiente de la deformación e igual a la resistencia a la fluencia.
- La máxima deformación unitaria en la fibra extrema en compresión de la mampostería en concreto debe tomarse como 0.003.

En el diseño de muros de mampostería reforzados internamente con barras de acero, se prevé que el elemento presente una falla por fluencia en el acero, de tal forma que se

presente un comportamiento dúctil y se disipe la energía por medio de las deformaciones, basándose en un diseño subreforzado. En el caso de la mampostería reforzada con barras de FRP, durante el diseño se prevé que la falla sea por aplastamiento en las piezas de mampostería, específicamente diseño sobreforzado; sin embargo, lo recomendable es no llevar los diseños a condiciones de falla, al presentarse un aplastamiento en la mampostería, se pierde el confinamiento del mortero de relleno que envuelve el refuerzo y el sistema deja de trabajar monolíticamente.

Por lo tanto, a continuación, se presentan las consideraciones y ecuaciones estipuladas para el cálculo de capacidad a flexión fuera del plano de la mampostería reforzada con FRP.

1.5.1 Cuantía balanceada y modo de falla

El modo de falla se predice comparando la cuantía usada con la cuantía balanceada y poder establecer con esta comparación si la falla es por aplastamiento en la mampostería o por falla en las barras de refuerzo.

Ecuación 1

$$\rho_b = (\alpha_1) * \left(\frac{f'_m}{F_{fu}} \right) * (\beta_1) * \left(\frac{\epsilon_{mu}}{\epsilon_{mu} + \epsilon_{fu}} \right)$$

Ecuación 2

$$\rho = \frac{A_f}{b * d}$$

Donde los valores de los coeficientes α_1 y β_1 se toman de acuerdo con lo establecido en el TMS, que es la guía de diseño de mampostería.

1.5.2 Profundidad del eje neutro

Para el cálculo de la profundidad del eje neutro se calculan las constantes A., B y C, que están en función de las propiedades geométricas y mecánicas de los muros en mampostería y las propiedades mecánicas de las barras de GFRP junto con su cuantía.

Ecuación 3

$$c = \frac{-B + \sqrt{B^2 - (4)(A)(C)}}{2 * A}$$

Donde:

$$A = (\alpha_1) * (f'_m) * (b) * (\beta_1) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$B = (A_f) * (E_f) * (\epsilon_{mu}) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$C = (A_f) * (E_f) * (\epsilon_{mu}) * d \quad \text{Ecuación 6}$$

1.5.3 Deformación unitaria en la barra

Para el procedimiento de cálculo de la deformación unitaria de la barra de refuerzo GFRP, se tiene en cuenta la ubicación del refuerzo, la profundidad del eje neutro y la deformación unitaria máxima de la mampostería.

Ecuación 7

$$\epsilon_f = \frac{(d - c) * (\epsilon_{mu})}{c}$$

1.5.4 Momento resistente nominal

El valor calculado mediante la siguiente ecuación es el correspondiente al momento teórico y se comparará el momento resultante de los ensayos de laboratorio.

Ecuación 8

$$M_n = (\alpha_1) * (f'_m) * (b) * (\beta_1) * (c) * \left\{ d - \left[(\beta_1) \left(\frac{c}{2} \right) \right] \right\}$$

1.5.5 Carga de falla

Debido a que la carga que se va a aplicar en los muros equivale a dos cargas puntuales colocadas a los tercios de la altura del muro, el momento para este sistema de equilibrio, es igual a la carga por la distancia de aplicación de esta al apoyo, por lo tanto, tenemos que:

Ecuación 9

$$P = 6 * \left(\frac{M_1}{L}\right)$$

1.5.6 Momento de agrietamiento

Para el cálculo del momento de agrietamiento, se tiene en cuenta las propiedades geométricas del muro y el módulo de rotura f_r .

Ecuación 10

$$M_{cr} = f_r * S$$

Donde:

$$S = \left(\frac{I_g}{d}\right) \quad \text{Ecuación 11}$$

El módulo de rotura depende de, si las celdas estén llenas o no de “grout”, esto de acuerdo con lo estipulado en el TMS 402 como se puede ver en la siguiente tabla.

Tabla 1-2 Módulo de ruptura f_r [10]

Table 3.1.8.2 — Modulus of rupture, f_r , psi (kPa)

Direction of flexural tensile stress and masonry type	Mortar types			
	Portland cement/lime or mortar cement		Masonry cement or air entrained portland cement/lime	
	M or S	N	M or S	N
Normal to bed joints				
Solid units	100 (689)	75 (517)	60 (413)	38 (262)
Hollow units ¹				
UngROUTED	63 (431)	48 (331)	38 (262)	23 (158)
Fully grouted	163 (1124)	158 (1089)	153 (1055)	145 (1000)
Parallel to bed joints in running bond				
Solid units	200 (1379)	150 (1033)	120 (827)	75 (517)
Hollow units				
UngROUTED and partially grouted	125 (862)	95 (655)	75 (517)	48 (331)
Fully grouted	200 (1379)	150 (1033)	120 (827)	75 (517)
Parallel to bed joints in masonry not laid in running bond				
Continuous grout section parallel to bed joints	250 (1734)	250 (1734)	250 (1734)	250 (1734)
Other	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

¹ For partially grouted masonry, modulus of rupture values shall be determined on the basis of linear interpolation between fully grouted hollow units and ungrouted hollow units based on amount (percentage) of grouting.

1.5.7 Deflexiones máximas en el muro

Para realizar el cálculo de las deflexiones en el muro, se considera la inercia y el momento del muro agrietado, así como estas variables en condiciones normales.

Ecuación 12

$$\delta = \left(\frac{23 * M_{cr} * L^2}{216 * E_m * I_g} \right) + \left(\frac{23 * (M_n - M_{cr}) * L^2}{216 * E_m * I_{cr}} \right)$$

Donde:

$$I_g = \frac{b * t^3}{12} \quad \text{Ecuación 13}$$

Para calcular la inercia en condición de agrietamiento se tiene en cuenta la relación entre los módulos de elasticidad de las barras de refuerzo y la mampostería.

$$I_{cr} = \left(\frac{b * c^3}{3} \right) + [A_f * n * (d - c)^2] \quad \text{Ecuación 14}$$

$$n = \frac{E_f}{E_m} \quad \text{Ecuación 15}$$

1.5.8 Cálculo de la longitud de traslapo

Las siguientes ecuaciones con las cuales se calculan las longitudes de traslapo se tomaron del ACI 440, especificadas para barras de FRP embebidas en elementos de concreto; como ya se mencionó se toman de base al no contar con una guía de diseño que permita calcular la longitud de traslapo de las barras de GFRP usado como refuerzo interno de muros de mampostería de concreto.

La longitud de desarrollo de las barras de FRP, viene dada por la siguiente expresión

Ecuación 16

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{\sqrt{f'_m(\text{psi})}} - 340}{13,6 + \frac{C}{d_b}} * d_b$$

Donde:

Ecuación 17

$$f_{fr} = \sqrt{\frac{(E_f * \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.80 * \beta_1 * f'_m}{\rho_f} * E_f * \varepsilon_{cu} - 0.5 * E_f * \varepsilon_{cu}}$$

Ecuación 18

$$\rho_{fb} = 0.80 * \beta_1 * \frac{f'_m}{f_{fu}} * \frac{E_f * \varepsilon_{mu}}{E_f * E_{mu} + f_{fu}}$$

Ecuación 19

$$\rho_f = \frac{A_f}{b * d}$$

2.Estado del arte

Fundamentalmente, los trabajos de investigación que se han desarrollado se han centrado en el estudio del FRP y sus efectos sobre su capacidad a flexión y corte de los muros de mampostería, teniendo en cuenta diferentes variables como la geometría, la cuantía de refuerzo y la ubicación del refuerzo, evaluando deformaciones, esfuerzos y resistencia a flexión fuera del plano y a cortante en el plano mediante la aplicación de diferentes metodologías y ensayos.

Las investigaciones desarrolladas sobre muros reforzados internamente con barras de FRP, no se han centrado en evaluar y determinar los requisitos de longitud de traslapo requerida, a pesar del impacto significativo de estos requisitos en la seguridad y la economía de construcción de muros de mampostería.

A continuación, se presentarán algunas investigaciones realizadas acerca de muros de mampostería reforzados usando barras de FRP, desarrolladas en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito que comprenden el estudio del comportamiento de elementos reforzados con barras de FRP.

2.1 Comportamiento Ante Carga Perpendicular al Plano, de Muros de Mampostería en Concreto, Reforzados con Barras de FRP

Daniel Otálora Barros. Julio 2017 [5]

En la investigación se analizó el comportamiento ante carga perpendicular al plano, de muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de GFRP Y CFRP continuas, las variables estudiadas en este proyecto de investigación fueron la longitud de los muros y las cuantías de refuerzo interno de los muros; durante los ensayos se midieron las deformaciones en las barras y se registraron las deflexiones a la mitad de la altura de los

muros obteniendo como conclusión que los muros reforzados con FRP al ser sometidos a su máxima capacidad presentaron un comportamiento de deflexiones elásticas y recuperables, presentando la ventaja de poder ser reparados debido a que su material de refuerzo, no presenta una zona de plasticidad, dejando daños permanentes en el muro y su comportamiento es elástico hasta la falla.

El modo de falla presentado en los muros reforzados con FRP fue por aplastamiento en la mampostería coincidiendo con la falla teórica esperada y la capacidad calculada de acuerdo con las ecuaciones desarrolladas y presentadas anteriormente.

A continuación, en la **Figura 2-1**, se podrá observar la geometría de los muros usados teniendo en cuenta que su longitud es variable como se especifica en la **Tabla 2-1** donde, además, se presenta la tipología de los muros con las variables anteriormente mencionadas.

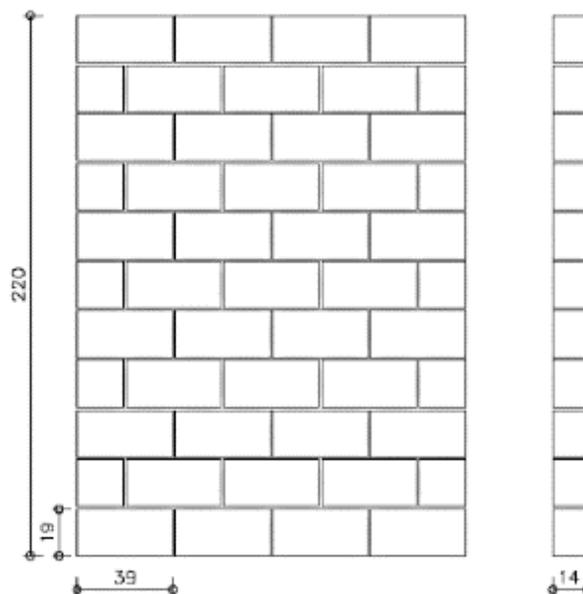


Figura 2-1: Configuración geométrica muros (cm) [5]

Tabla 2-1: Resumen de los muros del programa experimental [5]

Muro	Longitud (cm)	Refuerzo	Cantidad	Separación	Diámetro	As (mm ²)	Cuantía
Tipo 1	160	GFRP	4	40	#4	507	0.0045
Tipo 2	120	GFRP	2	60	#4	253	0.0030
Tipo 3	180	GFRP	3	60	#4	380	0.0030
Tipo 4	160	GFRP	2	80	#4	253	0.0023
Tipo 5	100	GFRP	1	100	#4	127	0.0018
Tipo 6	120	GFRP	1	120	#4	127	0.0015
Tipo 7	140	GFRP	1	140	#4	127	0.0013
Tipo 8	160	CFRP	4	40	#4	507	0.0045
Tipo 9	120	CFRP	2	60	#4	253	0.0030
Tipo 10	180	CFRP	3	60	#4	380	0.0030
Tipo 11	160	CFRP	2	80	#4	253	0.0023
Tipo 12	100	CFRP	1	100	#4	127	0.0018
Tipo 13	120	CFRP	1	120	#4	127	0.0015
Tipo 14	140	CFRP	1	140	#4	127	0.0013
Tipo 15	160	Acero	4	40	#4	516	0.0046
Tipo 16	160	Acero	3	60	#4	387	0.0035

En la *Figura 2-2* se observa la disposición del refuerzo usado en los muros que se ensayaron en la investigación.

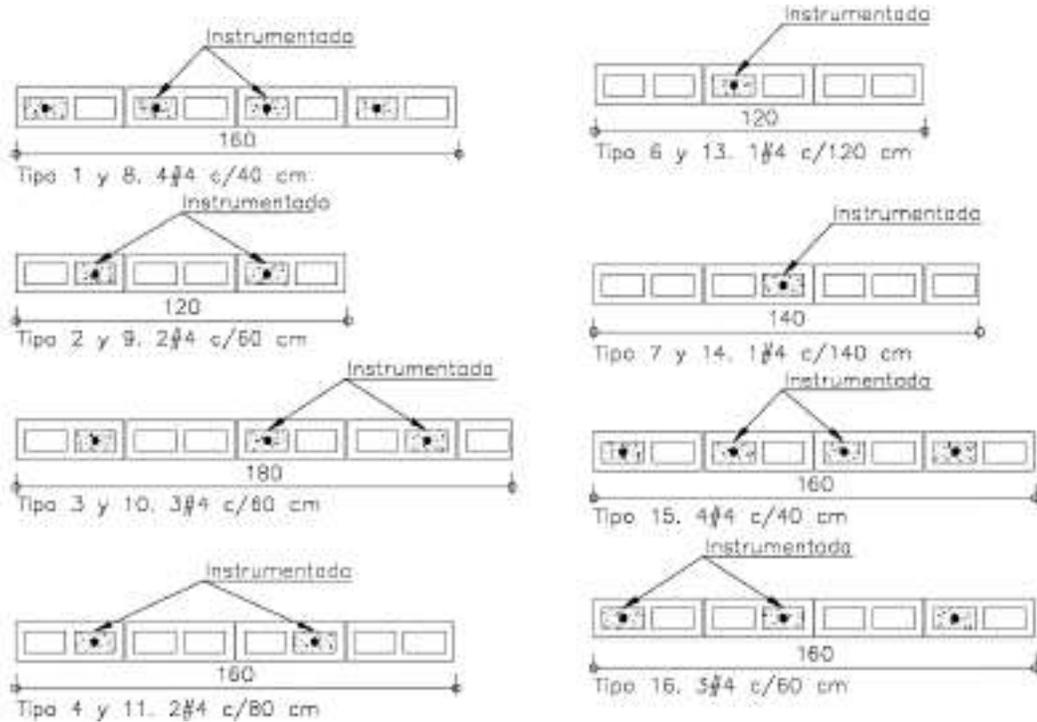


Figura 2-2: Configuración del refuerzo de los muros [5]

A continuación, se mostrará el montaje de los muros y el estado de los elementos después de la falla.



Figura 2-3: Vista general del montaje [5]



Rotura en barras FRP



Aplastamiento en la mampostería



Aplastamiento en el mortero de pega



Fisuras horizontales en el mortero de pega

Figura 2-4: Estado final elementos del muro después de ensayos [5]

2.2 Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP

Luis Alfonso Quintana Ruiz. Junio 2017[4]

En esta investigación se evaluó el comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP y a modo de comparación dos muros reforzados con barras de acero, las variables estudiadas en esta investigación fueron la longitud de los muros, las cuantías con las cuales se reforzaron los muros y el material de la barra de FRP; las conclusiones de la investigación fueron que los muros reforzados con barras de FRP experimentan deflexiones mayores a los muros reforzados con acero convencional, además, al comparar el diseño de muros con acero convencional y el de muros reforzados con FRP se debe tener en cuenta los estados límites de servicio ya que los muros reforzados con FRP presentan deflexiones mayores y por lo tanto anchos de fisuras mayores a los de acero bajo cargas relativamente bajas (para el primer y segundo ciclo de carga). En cuanto al estado límite de resistencia la mampostería reforzada con FRP podría tener valores mayores que reforzándola con acero convencional si se mejoran la adherencia entre mortero de pega y las unidades de arcilla y entre barras y mortero de relleno.

Tabla 2-2: Resumen de muros del programa experimental [4]

Muro	Nomenclatura	Ancho mm	Refuerzo
M1	M1-G	1045	4 Barras de GFRP
M2	M2-G	1490	4 Barras de GFRP
M3	M3-G	1345	3 Barras de GFRP
M4	M4-G	745	1 Barra de GFRP
M5	M5-G	890	1 Barra de GFRP
M6			1 Barra de GFRP
M7	M7-G	1490	1 Barra de GFRP
M8	M8-C	1045	4 Barras de CFRP
M9	M9-C	1490	4 Barras de CFRP
M10	M10-C	1345	3 Barras de CFRP
M11	M11-C	745	1 Barra de CFRP
M12	M12-C	890	1 Barra de CFRP
M13	M13-C	1190	1 Barra de CFRP
M14			1 Barra de CFRP
M15	M15-S	1490	4 Barras de Acero
M16	M16-S	1490	3 Barras de Acero

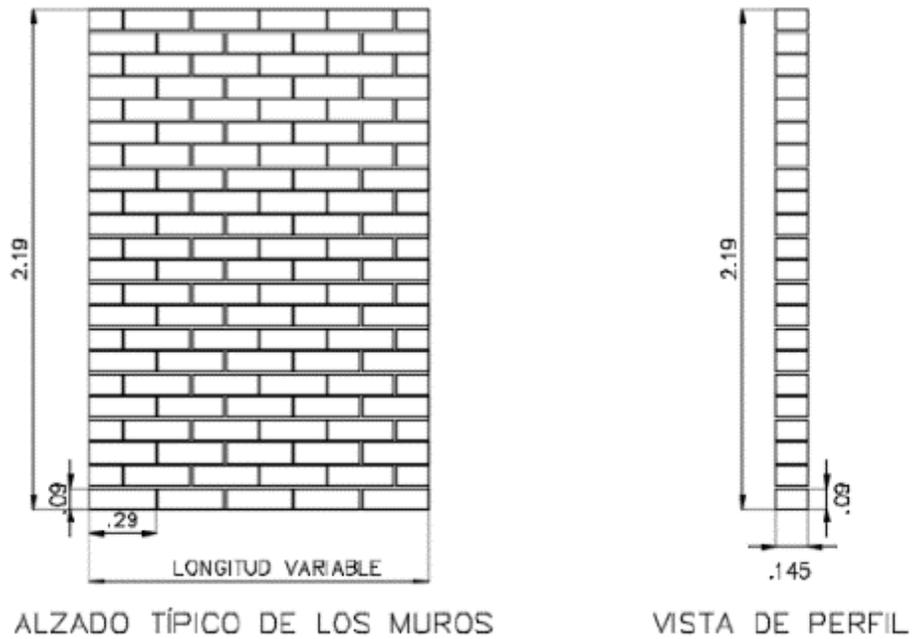


Figura 2-5: Configuración de los muros [4]

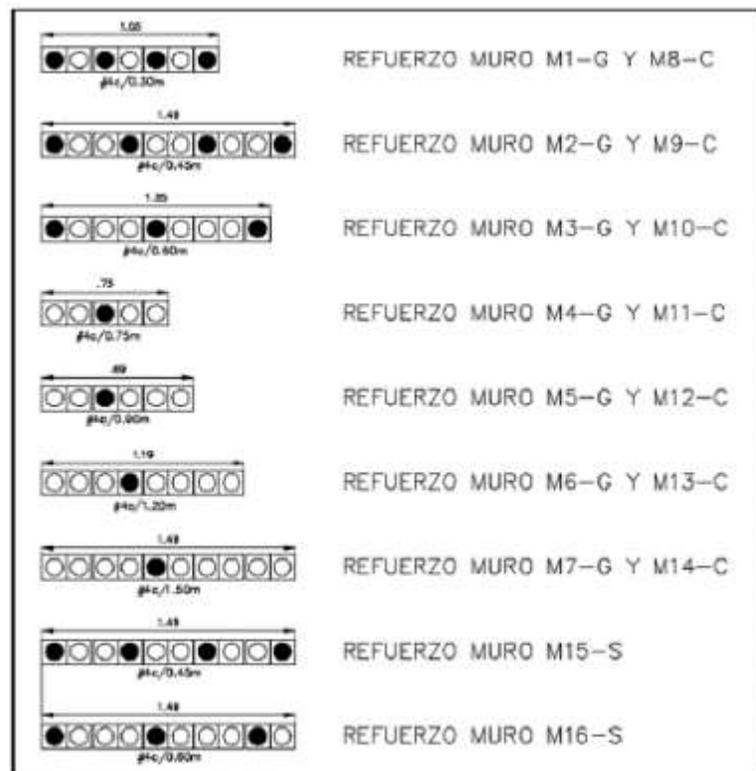


Figura 2-6: Configuración dimensional y de refuerzo de los muros [4]



Figura 2-7: Carga aplicada al muro M1-G [4]

Para continuar con la línea de investigación, dado que es un tema de alta pertinencia y que a nivel mundial son pocas las investigaciones desarrolladas, se planteó el presente proyecto de investigación, donde se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos y ecuaciones propuestas en las anteriores investigaciones de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP, con el fin de enfocar el presente estudio en la determinación de la longitud de traslapo necesaria para desarrollar una capacidad similar al muro con barras continuas.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión de los muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP ante cargas fuera del plano.

3.2 Objetivos específicos

- Determinar experimentalmente, las cargas últimas de los muros de mampostería cargados perpendicularmente a su plano y compararlas con las calculadas teóricamente con la metodología de cálculo de capacidad a flexión fuera del plano desarrollada en estudios previos en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Comparar las deflexiones en el centro del muro ante cargas fuera del plano de los muros de mampostería en concreto reforzados con barras de GFRP y las calculadas teóricamente.
- Identificar los modos de falla de los muros ensayados reforzados con barras de GFRP traslapadas.
- Determinar la influencia de la longitud de traslapo calculada con la ecuación existente en la capacidad de los muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP ante cargas fuera del plano comparando los resultados obtenidos experimentalmente de los muros con barras traslapadas con los obtenidos en los muros de barras continuas.

4. Programa experimental

4.1 Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación, y con el fin de plantear el programa experimental, se llevó a cabo una exhaustiva revisión del estado del arte, posteriormente, se seleccionaron los materiales a utilizar y con base en las variables definidas (Diámetro de la barra, posición de la barra en la dovela, continuidad de la barra, resistencia a la compresión de la mampostería) se dimensionaron los diferentes especímenes a ensayar y se calcularon las capacidades teóricas de los muros con base en las dimensiones, propiedades de materiales, modo de falla esperado y finalmente se calcularon las longitudes de traslapo empleando la **Ecuación 16**.

4.2 Variables estudiadas

A continuación, se presentan las variables consideradas para el desarrollo de la presente investigación:

- Diámetro de la barra de refuerzo de GFRP (#4 y #5)
- Continuidad de las barras (continuas y traslapadas)
- Ubicación de la barra en la dovela (Centrada y desplazada)
- Resistencia a compresión de la mampostería. $f'_m = 10\text{MPa}$ (1500) y 17MPa (2500 psi)

4.3 Descripción de los materiales

A continuación, se describen los diferentes materiales usados para la construcción de los muros especificando las propiedades esperadas de cada uno de ellos.

4.3.1 Mortero de pega

El mortero utilizado para unir las unidades de mampostería en concreto fue de resistencia a la compresión esperada f'_{cp} de 12.5 MPa (tipo S) para los muros de $f'_m = 10$ MPa (1500 psi) y de f'_{cp} 17.5 MPa (tipo M) para los muros de $f'_m = 17$ MPa (2500 psi) y una fluidez entre 110 – 120 % siguiendo las especificaciones de la norma NTC 3329.

4.3.2 Mortero de relleno

El mortero de relleno que se usó fue un “grout” fluido con una resistencia a la compresión esperada f'_{cr} de 28MPa para los muros de $f'_m = 10$ MPa (1500psi) y de f'_{cr} 32 MPa para los muros de $f'_m = 17$ MPa (2500 psi) y un tamaño máximo del agregado de 3/4” (10 mm) y se siguieron para su elaboración y ensayo los lineamientos de las normas NTC 4048 y ASTM C476.

4.3.3 Mampostería de concreto

Los bloques de mampostería de perforación vertical de concreto usados para la construcción de los muros, cumplen con la norma NTC 4026 (ASTM C90). A continuación, en la **Figura 4-1** se muestran las dimensiones de bloque de mampostería de concreto.

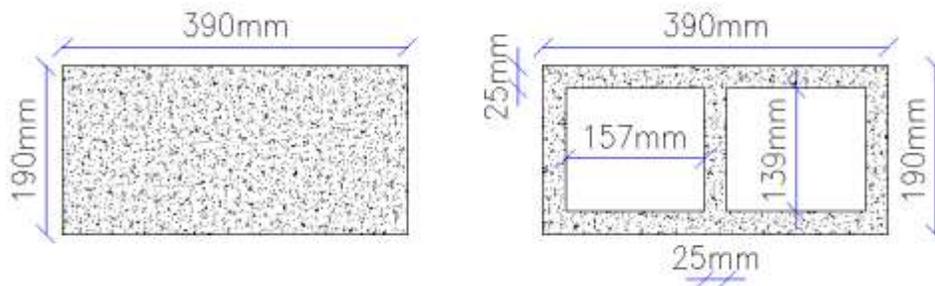


Figura 4-1 Características del bloque de concreto usado

4.3.4 Barras de GFRP

Las barras de GFRP de #4 y #5, utilizadas en la presente investigación fueron suministradas por la Universidad de Miami. La ubicación dentro de las celdas de los muros de estas barras como ya se mencionó, se determinó como una variable, donde en dos especímenes se ubicaron las barras desplazadas hacia la cara de las tensiones, mientras que en el resto de los muros se instalaron centradas.

4.4 Configuración de los especímenes

A continuación, en la Tabla 4-1 se presenta la nomenclatura, las características y detalles de refuerzo de los muros estudiados. La nomenclatura empleada para identificar los especímenes fue inicialmente M seguida del número del muro, durante el desarrollo de la investigación se renombraron los muros y se le asignó una nomenclatura en la cual se presentaran sus propiedades y esta se compone de la siguiente manera (#barra-f'm (psi)-Centrada/Desplazada-Completa/Traslapo-longitud de traslapo-Consecutivo), en la Tabla 4-1 se puede observar cada uno de los nombres asignados. La longitud de todos los muros estudiados es de 1.20 m, este ancho se mantuvo constante al igual que el número de barras colocadas en cada muro

Tabla 4-1 Identificación de muros de prueba y características del refuerzo

NOMBRE INICIAL	NOMBRE FINAL	Sep ext (mm)	# Barras GFRP	Diámetro Barra	As mm ²
M1	5-1500-C-T-1,18- A	95	2	#5	395,87
M2	5-1500-C-T-1,18- B	95	2	#5	395,87
M4	5-1500-C-C	95	2	#5	395,87
M9	4-1500-C-T-1,15-A	95	2	#4	253,35
M10	4-1500-C-T-1,15-B	95	2	#4	253,35
M13	4-1500-C-C	95	2	#4	253,35
M15	5-2500-C-T-1,23- A	95	2	#5	395,87
M16	5-2500-C-T-1,23- B	95	2	#5	395,87
M17	5-2500-C-C	95	2	#5	395,87
M18	5-1500-D-T-1,18	150	2	#5	395,87
M20	5-1500-D-C	150	2	#5	395,87

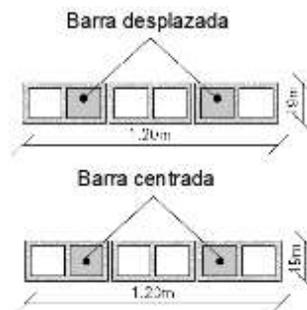


Figura 4-2 Ubicación de las barras en las dovelas del muro

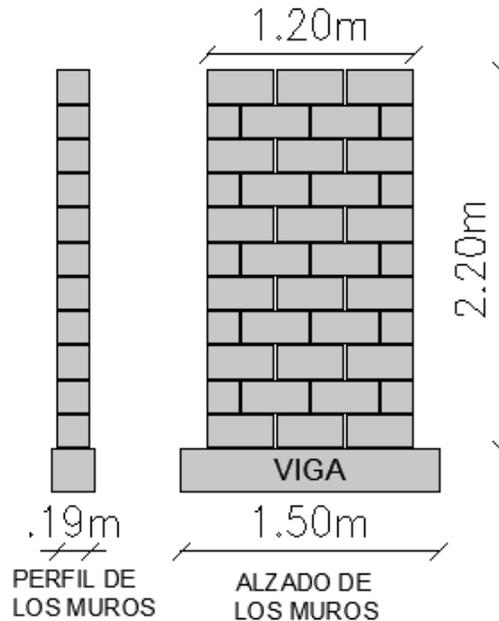


Figura 4-3 Geometría de los muros

4.5 Cálculo de la capacidad resistente de los muros

Mediante las ecuaciones planteadas en los proyectos del Ing. Otalora [5] y el Ing. Quintana [4], se calcularon los momentos y deflexiones esperadas para cada uno de los muros.

Las propiedades de los materiales y las constantes a usar para evaluar la capacidad de los muros mampostería que se tuvieron en cuenta fueron:

Mampostería de 10MPa

- $f'_m = 10 \text{ MPa}$
- $E_m = 9000 \text{ MPa}$
- $\epsilon_{mu} = 0.003 \text{ mm/mm}$
- $\alpha_1 = 0.8$
- $\beta_1 = 0.8$

Mampostería de 17MPa

- $f'_m = 17 \text{ MPa}$
- $E_m = 9000 \text{ MPa}$
- $\epsilon_{mu} = 0.003 \text{ mm/mm}$
- $\alpha_1 = 0.8$

- $\beta_1 = 0.8$

Las propiedades de las barras de GFRP que se tuvieron en cuenta para los análisis fueron las siguientes:

- f_{fu} 758 MPa (110 ksi)
- E_f 62052 MPa (9000 ksi)
- ε_{fu} 0.018mm/mm

Con estas propiedades y la metodología descrita en el Marco Teórico se realizó el cálculo teórico de la capacidad de los muros. A continuación, se hará a modo de ejemplo el paso a paso del cálculo de la capacidad del muro 1.

Evaluación de la cuantía balanceada y modo de falla.

$$\rho_b = (0.8) * \left(\frac{10MPa}{1117 MPa} \right) * 0.8 * \left(\frac{0,003mm/mm}{0,003mm/mm + 0,0179849mm/mm} \right) = 0.00082$$

$$\rho = \frac{395,87mm^2}{1200mm * 95mm} = 0,00347$$

Dado que la cuantía es mayor que la cuantía balanceada, el modo de falla esperado del muro es por aplastamiento en la mampostería.

Cálculo de la deformación unitaria en la barra

$$c = \frac{-73691.2005 N + \sqrt{(73691.2005 N)^2 - \left[(4) * \left(7680 \frac{N}{mm} \right) * (-7000664 N * mm) \right]}}{2 * 7680 \frac{N}{mm}}$$

$$c = 25.77mm$$

Donde:

$$A = 0.8 * 10MPa * 1200mm * 0.8 = 7680 \frac{N}{mm}$$

$$B = 395.87 mm^2 * 62050 MPa * 0.003 \frac{mm}{mm} = 73691.2005 N$$

$$C = -395.87 \text{ mm}^2 * 62050 \text{ MPa} * 0.003 \frac{\text{mm}}{\text{mm}} * 95 \text{ mm} = -7000664 \text{ N} * \text{mm}$$

$$\varepsilon_f = \frac{(95 \text{ mm} - 24.28 \text{ mm}) * 0.03 \text{ mm/mm}}{24.28 \text{ mm}} * 100 = 0.87\%$$

Cálculo del Momento resistente nominal.

$$M_n = (0.80) * (10 \text{ MPa}) * (1200 \text{ mm}) * (0.8) * (24.28 \text{ mm})$$

$$* \left\{ 95 \text{ mm} - \left[(0.80) * \left(\frac{24.28 \text{ mm}}{2} \right) \right] \right\}$$

$$M_n = 16.76 \text{ kN} * \text{m}$$

Cálculo de la carga de falla.

$$P = (6) * \left(\frac{16.76 \text{ kN} * \text{m}}{2001 \text{ mm}} \right) = 50.04 \text{ kN}$$

Cálculo del momento de agrietamiento

$$f_r = 0.71 \text{ MPa}$$

$$I_g = \frac{(1200 \text{ mm}) * (190 \text{ mm})^3}{12} = 685900000 \text{ mm}^4$$

$$S = \frac{685900000 \text{ mm}^4}{95 \text{ mm}} = 7220000 \text{ mm}^3$$

$$M_{cr} = \frac{(0.71 \text{ MPa}) * (7220000 \text{ mm}^3)}{1000000} = 5.13 \text{ kN} * \text{m}$$

Deflexiones máximas en el muro

$$\delta = \left[\frac{(23) * (5.13) * 1000000 * (2200)^2}{216 * (9000) * (685900000)} \right] + \left\{ \frac{(23) * \{ [(16.76) - (5.13)] * 1000000 \} * (2200)^2}{216 * (9000) * (19375703)} \right\}$$

$$\delta = 33.87 \text{ mm}$$

Donde:

$$I_{cr} = \left[\frac{(1200 \text{ mm}) * (24.28 \text{ mm})^3}{3} \right] + [(395.87 \text{ mm}^2) * (6.89) * (95\text{mm} - 24.28\text{mm})^2]$$

$$I_{cr} = 19375703 \text{ mm}^4$$

Siguiendo este procedimiento, se calculó la capacidad resistente de todos los muros, a continuación, en la **Tabla 4-2**, se presentan las cuantías, momentos y deflexiones esperadas.

Como ya se ilustró anteriormente, los muros están compuestos por dos barras de GFRP, el valor del $f_r=0,71$ es constante para los muros.

Tabla 4-2 Capacidad Teórica de los muros

NOMBRE INICIAL	f'm Mpa	Sep ext (mm)	Diámetro Barra	As mm ²	Cuantía ρ_n	Cuantía ρ_b	Mn KN.m	P (carga)	Mc _r KN.m	δ mm
								KN		
M1-2-4	10	95	#5	395,87	0,00347	0,00082	16,76	50,04	5,13	33,87
M9-10-13	10	95	#4	253,35	0,00222	0,00082	14,13	42,19	5,13	39,07
M15-16-17	17	95	#5	395,87	0,00347	0,00139	21,14	63,10	5,13	49,74
M18-20	10	150	#5	395,87	0,00220	0,00082	16,76	50,04	5,13	33,87

La cuarta fila de la tabla corresponde a los cálculos para el muro con la barra desplazada.

δ : Deflexión teórica

4.6 Cálculo de la longitud de traslapo

A continuación, se presenta el procedimiento para el cálculo de las longitudes de desarrollo y traslapo se usó la Ecuación 16 presentada anteriormente, se presentará el cálculo para un solo diámetro de las barras usadas en la presente investigación. Para establecer los datos de entrada se tienen en cuenta las propiedades de los materiales, los cuales son los siguientes:

$$E_f = 62052 \text{ MPa (9000 ksi)}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0025\text{mm/mm}$$

$$f'_m = 10 \text{ MPa (1.5ksi)}$$

$$\beta_1 = 0.80$$

$$f_{tu} = 758 \text{ MPa (110ksi)}$$

$$\alpha = 1,0$$

$$C = 3.74\text{in}$$

Usando la Ecuación 19 se obtiene:

$$\rho_f = \frac{2 * \pi * (0.5\text{in})^2}{3,74\text{in} * 46,8\text{in}} = 0.0026$$

Reemplazando este valor en la Ecuación 17 se obtiene:

$$f_{fr} = \sqrt{\frac{(9000\text{ksi} * 0.0025)^2}{4} + \frac{0.80 * 0.85 * 1.5\text{ksi}}{0.0026} * 9000\text{ksi} * 0.025 - 0.5 * 9000\text{ksi} * 0.0025}$$

$$f_{fr} = 88\text{ksi}$$

Finalmente obtenemos la longitud de desarrollo usando la Ecuación 16

$$ld = \frac{1.0 * \frac{88}{\sqrt{1500\text{psi}}} - 340}{13,6 + \frac{3.74\text{in}}{0.5}} * 0.5$$

$$ld = 46\text{in} = 1,15\text{m}$$

Como lo indica el ACI 440.1R debido a que no es necesario desarrollar toda la resistencia a la tracción de la barra dado que la cuantía utilizada es mayor que la cuantía balanceada, la suposición de que todos los empalmes son de clase B es conservadora.

Como el presente proyecto hace parte de un proyecto experimental y se cuenta con más especímenes, a medida que se iban obteniendo resultados se disminuía la longitud de desarrollo para evaluar su comportamiento, en el caso particular de este proyecto no se afectó la longitud de desarrollo calculada y se definió ésta como la longitud de traslapo a usar en las barras de refuerzo de GFRP.

$$ld = lt = 46\text{in} = 1,15\text{m}$$

Por lo tanto, siguiendo el procedimiento anterior se calcularon las longitudes de traslapo para los diferentes números de barras y resistencias a la compresión de la mampostería. En la siguiente tabla se presentan las longitudes de traslapo utilizadas:

Tabla 4-3 Cálculo de las longitudes de traslapo iniciales

Barra	db (in)	f* _{fu} (ksi)	ρ _f	f _{fr} (ksi)	l _d (in)	l _{splice} (in)	l _d (m)	l _{ta usar} (m)
Mampostería 10 MPa (1500psi)								
#4	0,5	110	0,0022	88	46	60	1,15	1,15
#5	0,625	105	0,0035	70	47	61	1,18	1,18
Mampostería 17 MPa (2500psi)								
#5	0,625	105	0,0035	84	49	64	1,23	1,23

^l_{splice}: longitud de traslapo para empalme tipo C según el ACR.440-1R

4.7 Disposición del refuerzo en los muros

La disposición del refuerzo en los muros de acuerdo con la configuración mencionada de los mismos se puede observar en la Figura 4-4 y en la Figura 4-5 que corresponden a los muros ensayados para la presente investigación. A continuación, en la Tabla 4-4 se mostrarán las características de los muros estudiados, las longitudes de traslapo calculadas y la posición del refuerzo de cada uno de ellos.

Tabla 4-4 Muros del programa experimental

NOMBRE INICIAL	NOMBRE FINAL	DESCRIPCIÓN				
		Diámetro de la barra	f' m (psi)	L muro (m)	l _d (m)	Posición Refuerzo
M1	5-1500-C-T-1,18- A	barra No. 5	1500	1,2	1,18	centrada
M2	5-1500-C-T-1,18 -B	barra No. 5	1500	1,2	1,18	centrada
M4	5-1500-C-C	barra No. 5	1500	1,2	completa	centrada
M9	4-1500-C-T-1,15-A	barra No. 4	1500	1,2	1,15	centrada
M10	4-1500-C-T-1,15-B	barra No. 4	1500	1,2	1,15	centrada
M13	4-1500-C-C	barra No. 4	1500	1,2	completa	centrada
M15	5-2500-C-T-- A	barra No.5	2500	1,2	1,23	centrada
M16	5-2500-C-T-- B	barra No.5	2500	1,2	1,23	centrada
M17	5-2500-C-C	barra No.5	2500	1,2	completa	centrada
M18	5-1500-D-T-1,18	barra No.5	1500	1,2	1,18	desplazada
M20	5-1500-D-C	barra No.5	1500	1,2	completa	desplazada

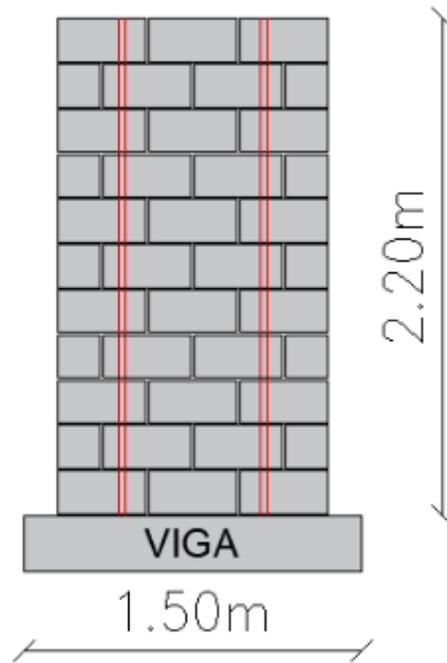


Figura 4-4 Muros con barras continuas

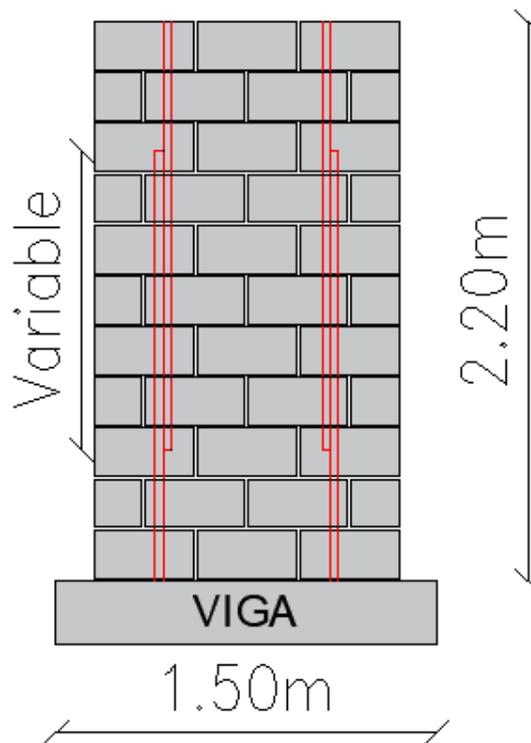


Figura 4-5 Muros con barras traslapadas

4.8 Elaboración de muros

4.8.1 Caracterización de los materiales

A continuación, se describirán las actividades realizadas para la caracterización de cada uno de los elementos que conforman los muros de mampostería.

4.8.2 Mortero de pega

Siguiendo los parámetros establecidos en la norma NTC3329 se elaboró el mortero de pega, para la toma de muestras y ensayos de los cilindros se siguieron los parámetros indicados por la norma NTC 3546. De la mezcla que se utilizó la elaboración de los muros, se construyeron cilindros de 50 mm de diámetro, por 100 mm de altura y se evaluó la resistencia a la compresión f'_{cp} . La mezcla del mortero de pega se muestra en la siguiente fotografía:



Fotografía 4-1 Elaboración del mortero de pega

4.8.3 Mortero de relleno

Para calcular la resistencia del mortero de relleno inyectado en las celdas de los muros de mampostería de concreto, se siguieron las indicaciones de la norma NTC 3356 A partir de

la mezcla utilizada para rellenar las celdas de los muros de mampostería, se construyeron cilindros de 100 mm de diámetro, por 200 mm de altura y se evaluó la resistencia a la compresión f'_{cr} . La mezcla y los cilindros de mortero de relleno se muestra en la **Fotografía 4-1** y la **Fotografía 4-2**.



Fotografía 4-2 Elaboración del grout de relleno para muros de mampostería de concreto



Fotografía 4-3 Elaboración cilindros de grout de relleno.

4.8.4 Mampostería de concreto

Se construyeron 14 muretes, seis de ellos con las celdas vacías y los otros ocho con las celdas llenas y se fallaron para calcular la resistencia a la compresión, f'_m . Las

dimensiones de los muretes fueron 19 cm x 60 cm – largo x alto –. Para calcular el $f'm$ se siguieron las recomendaciones del ACI-530.1-11. Los resultados de los ensayos se pueden ver en los anexos de este documento.

Para el cálculo de las capacidades de los muros se evaluó el $f'm$ mediante el método de correlación tomando los promedios de los resultados obtenidos en los ensayos de los cilindros de mortero de pega, mortero de relleno y muretes, dando como resultado que para la mezcla esperada de 1500 psi se obtuvo 11,51 MPa (1669,41 psi) y para la mezcla con resistencia esperada de 2500 psi se obtuvo 14,54 MPa (2108,82 psi).



Fotografía 4-4 Elaboración de muretes de mampostería



Fotografía 4-5 Montaje y ensayo de los muretes de mampostería

En resumen, para caracterizar los materiales se realizaron los ensayos correspondientes, en la 5 se presentan la cantidad de ensayos que se realizaron a cada material y las normas NTC y normas ASTM aplicables en su evaluación, en el anexo A se pueden ver los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos realizados a los materiales.

Tabla 4-5 Ensayos para caracterizar los materiales

Ensayo	Norma	Cantidad
Compresión cilindros de mortero de pega	ASTM C780/NTC 3546	23
Compresión cilindros mortero de relleno	ASTM C780/NTC 3546	36
Muretes de Mampostería	Recomendaciones ACI 530.1-11	14

4.8.5 Barras de GFRP

Las propiedades de las barras de GFRP fueron suministradas por el proveedor y son las siguientes:

$$f_{fu} = 758 \text{ MPa (110ksi)}$$

$$E_f = 46195 \text{ MPa (6700ksi)}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.018 \text{ mm/mm}$$



Fotografía 4-6 Barras de GFRP usadas

4.8.6 Proceso constructivo

La elaboración de los especímenes de mampostería de concreto reforzados con barras de GFRP, se realizó en el laboratorio de estructuras y materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

A continuación, se presenta el proceso constructivo que se implementó para la elaboración de los muros.

4.8.6.1 Vigas de apoyo de muros

Para apoyar los muros se reutilizaron vigas del laboratorio y se elaboraron las faltantes vigas de 25cm x 25cm, las cuales se reforzaron longitudinalmente con barras #4 de acero y se usaron barras #3 para la elaboración de los estribos de confinamiento.

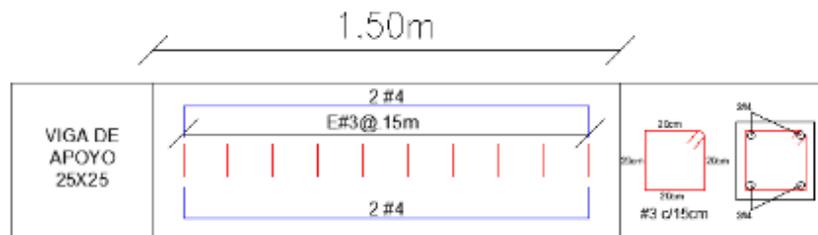


Figura 4-6 Refuerzo viga de apoyo de los muros

4.8.6.2 Elaboración de muros de mampostería de concreto reforzados con GFRP

Para la elaboración de estos muros se utilizaron los materiales descritos en el capítulo del marco teórico, en las siguientes fotografías se puede observar la elaboración de los especímenes.



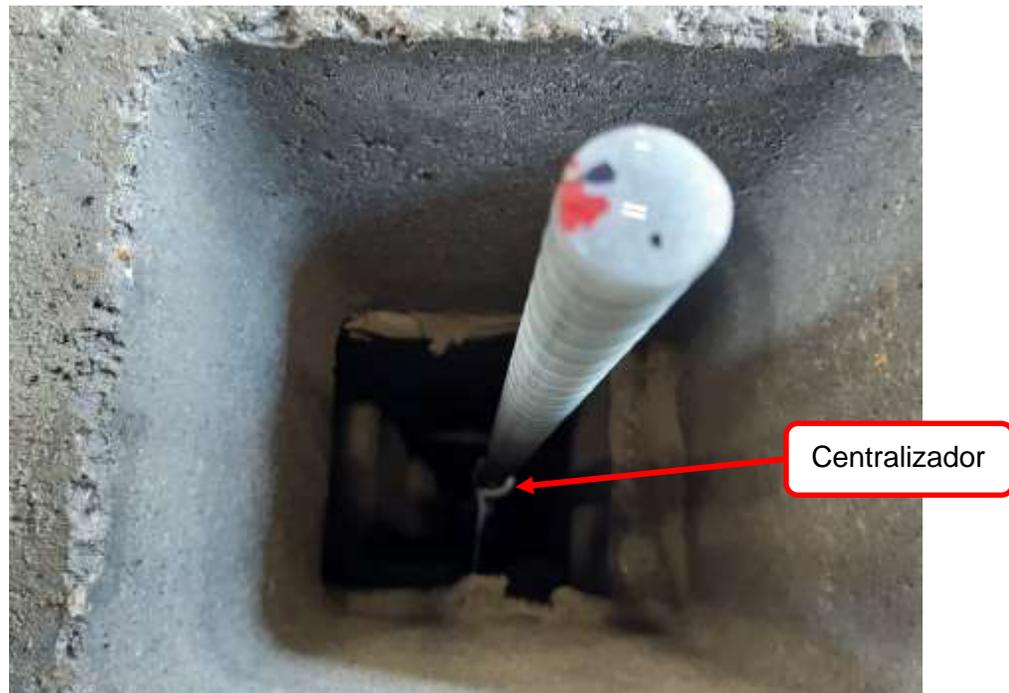
Fotografía 4-7 Elaboración de muro de mampostería de concreto



Amarres usados para fijar el traslapo

Fotografía 4-8 Traslado de barra de GFRP

Las barras se traslaparon y se amarraron con amarres plásticos garantizando de esta manera que no se deslizaran ni variara la longitud de traslapo establecida.



Fotografía 4-9 Instalación de la barra de GFRP en la celda



Fotografía 4-10 Instalación del grout de relleno de las celdas



Fotografía 4-11 Vibrado para eliminar acumulación de aire en el grout



Fotografía 4-12 Almacenamiento de muros ya construidos

4.9 Montaje para los ensayos

Una vez los muros cumplieran 28 días de ser elaborados se realizaba el montaje en el marco para su ensayo, el cual se muestra a continuación.

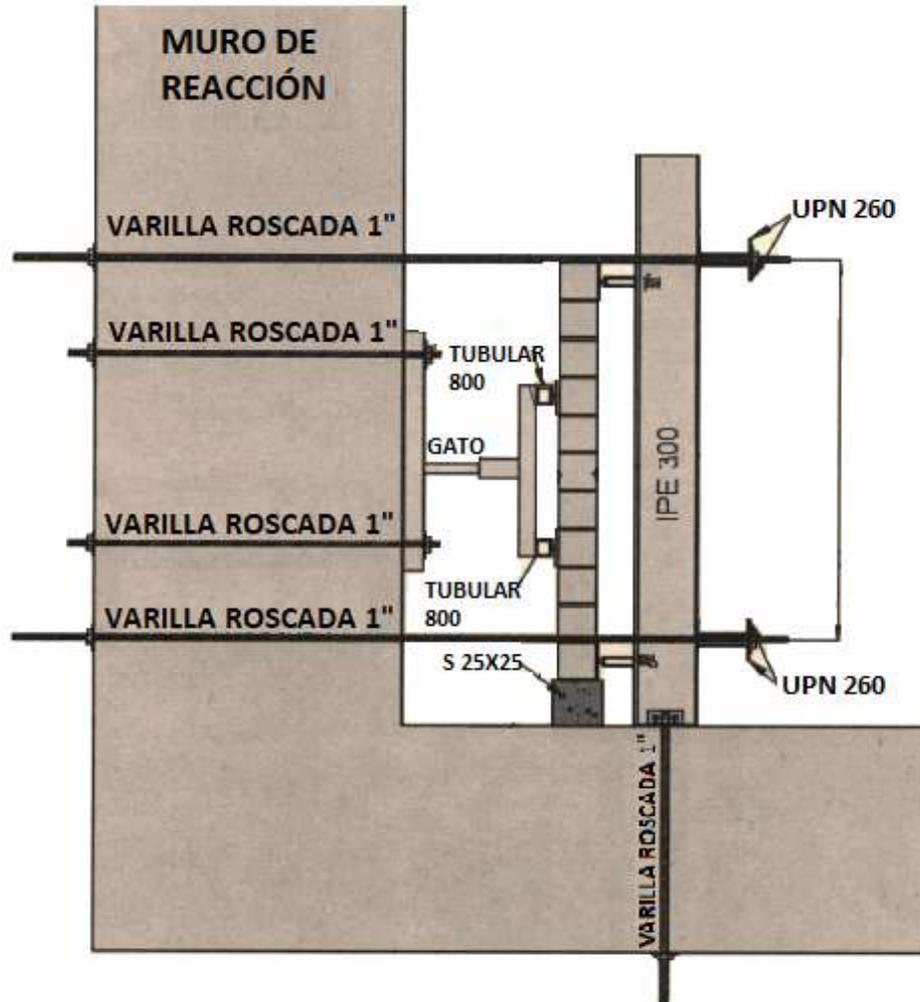
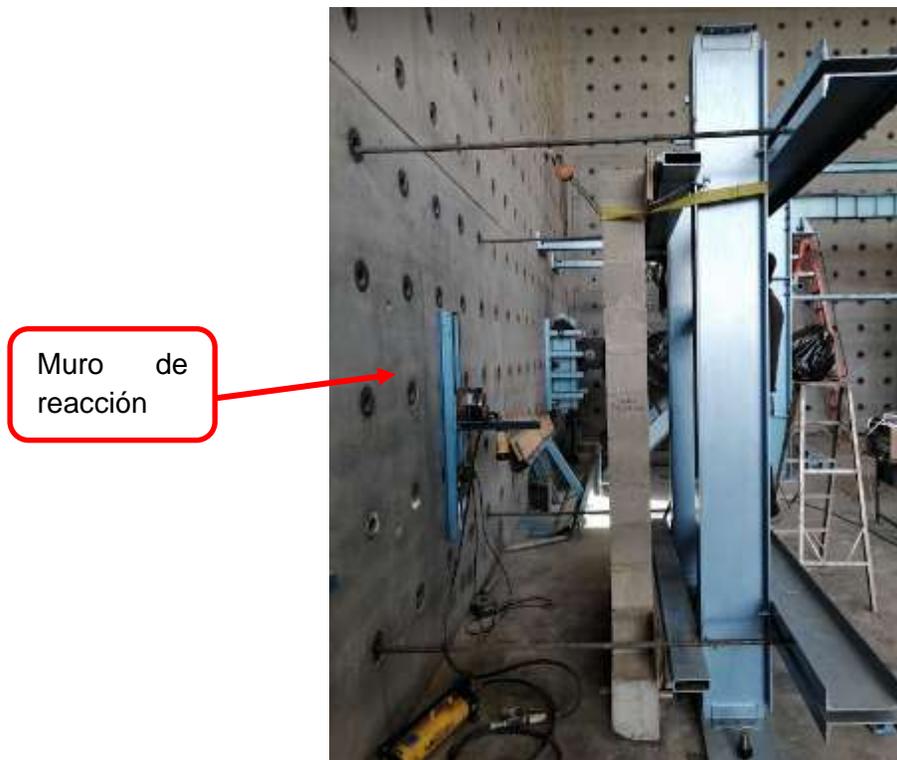


Figura 4-7 Montaje para ensayos

El marco en el que fueron ensayados los muros reacciona contra el muro de reacción.



Fotografía 4-13 Transporte de muro para ensayo



Fotografía 4-14 Montaje de muro en el marco

4.10 Instrumentación de los muros

Los muros se instrumentaron externamente en su cara a compresión, mediante una galga instalada en una unidad de mampostería, con el fin de registrar las deformaciones unitarias en ella durante el proceso de ensayo; igualmente por la cara sometida a tensión, se realizó la correspondiente instrumentación, mediante transductores de desplazamiento, LVDT, localizados a 10 cm de los bordes inferiores y superiores, contra el apoyo, así como en el centro de cada muro; con el fin de registrar los desplazamientos a medida que se aplicaba la carga.

La instrumentación utilizada y su localización se puede ver en la Figura 4-8 Instrumentación externa del muro.

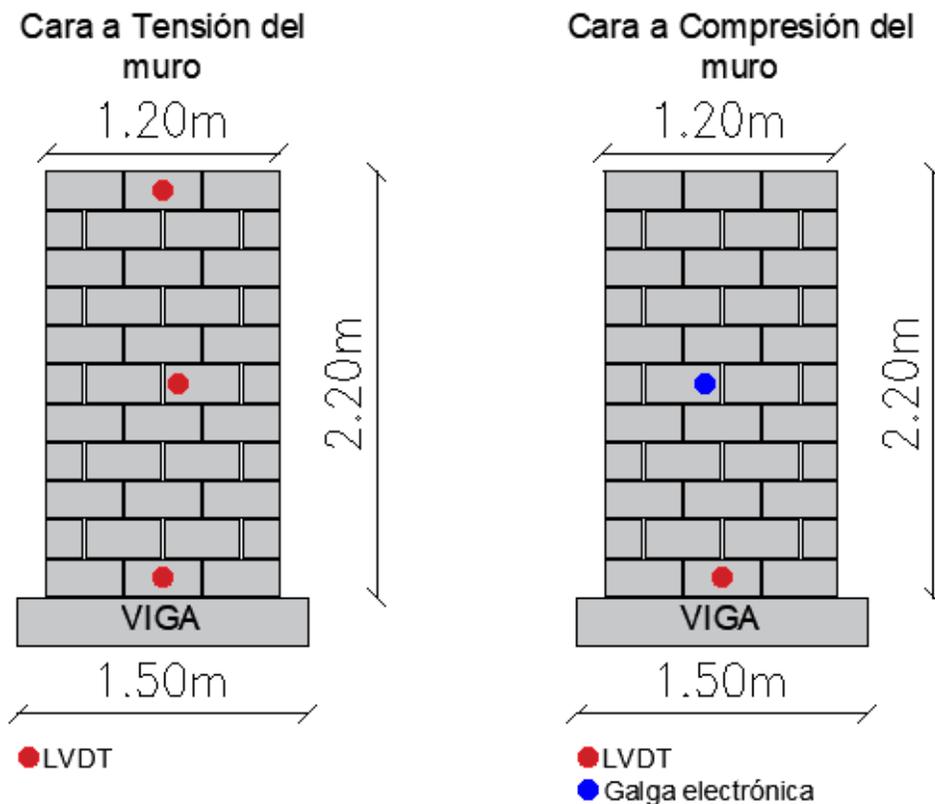
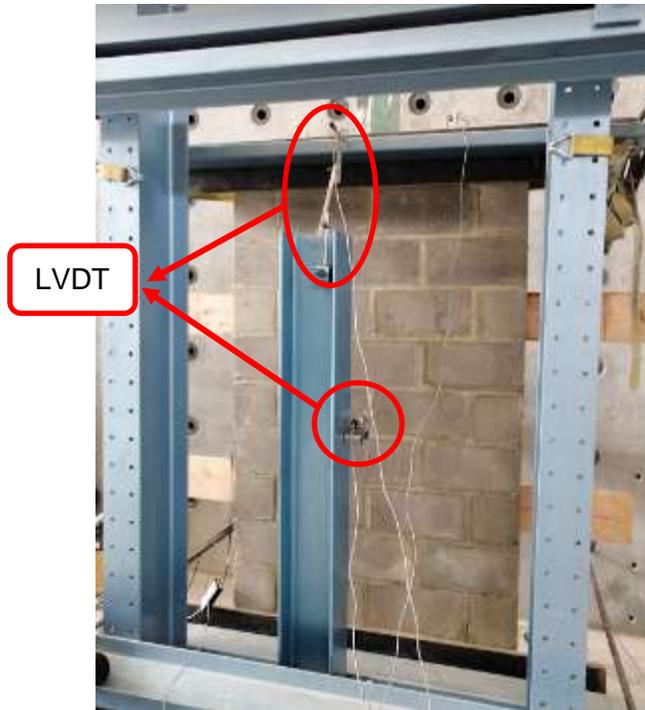


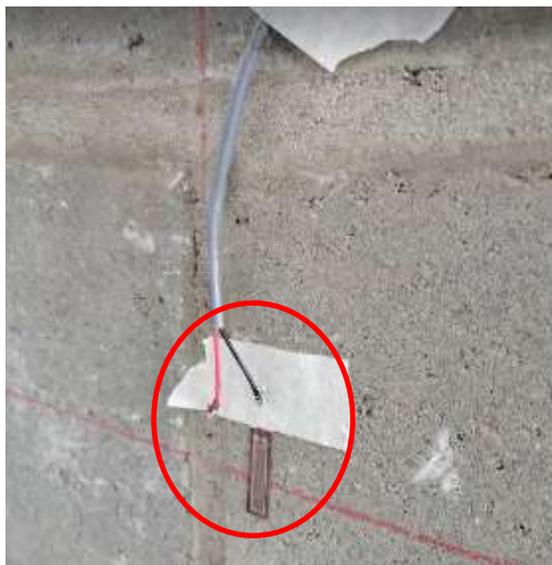
Figura 4-8 Instrumentación externa del muro



Instrumentación cara a tensión



Instrumentación cara a compresión



Galga electrónica



LVDT del apoyo superior



LVDT apoyo inferior – cara a compresión

Fotografías 4-15 Instrumentación de muro para ensayo

4.11 Protocolo de carga

Para definir el protocolo de carga que se implementaría para ensayar los muros, se determinaron las capacidades teóricas de los muros y se plantearon las siguientes etapas, estableciendo la toma de datos cada 300 kg.

1. Cargar el muro al 25% de su resistencia admisible esperada.
2. Descargar el muro al 5% de su resistencia admisible esperada.
3. Cargar el muro al 50% de su resistencia admisible esperada.
4. Descargar el muro al 5% de su resistencia admisible esperada.
5. Cargar el muro al 75% de su resistencia admisible esperada.
6. Descargar el muro al 5% de su resistencia admisible esperada.
8. Cargar el muro al 100% de su resistencia admisible esperada.
9. Descargar el muro al 5% de su resistencia admisible esperada.
10. Cargar el muro hasta llegar a la falla.

Siguiendo el protocolo de carga se hicieron los ensayos a cada uno de los muros; sus capacidades experimentales y modos de falla, se presentan en el **Anexo B**.

5.RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio

Por medio de un equipo de adquisición de datos, se obtuvieron con las galgas los datos de deformación en el centro del muro en la zona de compresiones y con ayuda de los LVDT se registraron las deflexiones del muro en su cara sometida a tensión en función del tiempo; adicional a esto se registró la carga aplicada al muro de acuerdo con el protocolo de carga; el operario del laboratorio accionaba el gato cargándolo y descargando manualmente tomando datos cada 300 kg de acuerdo al protocolo establecido.



Fotografía 5-1 Sistema de gato hidráulico.



Fotografía 5-2 Equipo de almacenamiento de datos.

En la Tabla 5-1 se presenta el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos para cada uno de los muros en estudio, los momentos experimentales se calcularon a partir de la carga de falla y la altura del muro con la siguiente fórmula:

Ecuación 20 Momento Experimental

$$M_{exp} = \frac{P}{2} * \frac{L}{3}$$

Donde:

P: Carga de falla del muro durante el ensayo

L: Longitud de ensayo

A continuación, se observan los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, donde se evidencia que la capacidad de los muros reforzados con barras #5 es ligeramente mayor en la mayoría de los muros cuando se encuentran las barras traslapadas (Longitud de traslapo 1,18 m) en comparación con los muros con las barras continuas.

Adicional a lo anterior al analizar la influencia de los diámetros de las barras de GFRP se puede observar que como se esperaba los muros reforzados con barras #5 traslapadas presentan mayor capacidad que los muros reforzados con barras #4 traslapadas, lo cual

no sucede si se hace esta misma comparación, pero con las barras de GFRP continuas ya que se evidencia una capacidad muy similar de los muros ensayados.

Tabla 5-1 Resultados de los ensayos

NOMBRE INICIAL	NOMBRE FINAL	Diámetro Barra	Pfalla		M _{exp} kN.m	Deflexión máxima (δ_{max}) mm	Deflexión residual ($\delta_{residual}$) mm
			Ton	kN			
M1	5-1500-C-T-1,18- A	#5	6,90	68,29	22,88	45	13
M2	5-1500-C-T-1,18 -B	#5	6,42	63,54	21,28	27	11
M4	5-1500-C-C	#5	6,13	60,67	20,32	41	10
M9	4-1500-C-T-1,15-A	#4	6,09	60,29	20,20	51	12
M10	4-1500-C-T-1,15-B	#4	5,50	54,43	18,23	43	9
M13	4-1500-C-C	#4	6,30	62,35	20,89	81	20
M15	5-2500-C-T-1,23- A	#5	6,50	64,33	21,55	28	9
M16	5-2500-C-T-1,23- B	#5	7,66	75,81	25,40	37	10
M17	5-2500-C-C	#5	6,60	65,32	21,88	50	9
M18	5-1500-D-T-1,18	#5	8,84	87,49	29,31	28	8
M20	5-1500-D-C	#5	7,75	76,70	25,69	33	11

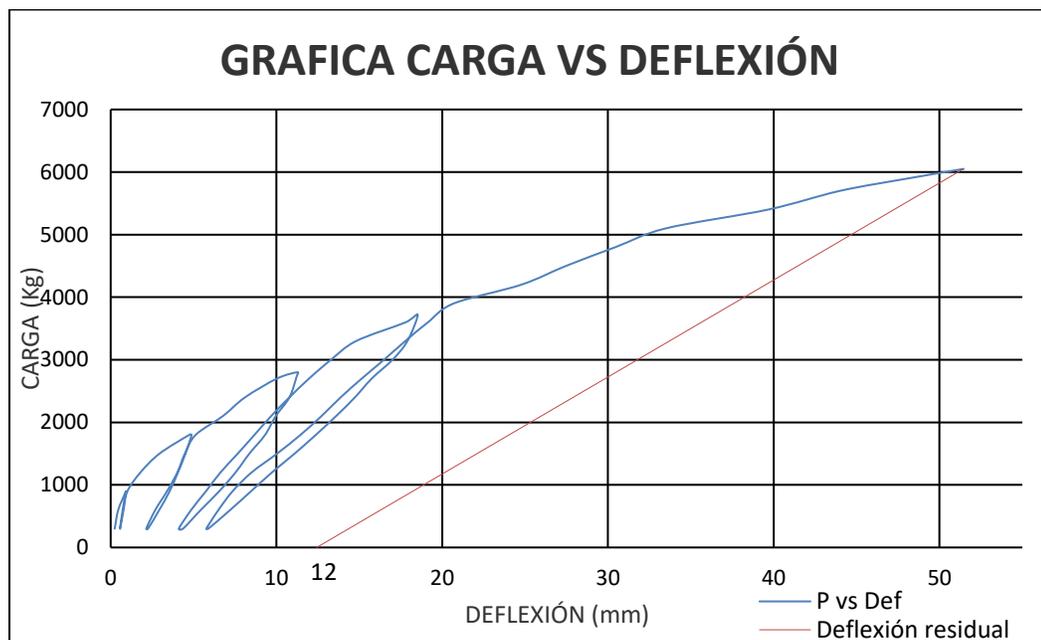
También se puede observar que al utilizar mampostería con mayor f_m se obtiene mayor capacidad del muro, pero a su vez estos muros presentaron una menor deflexión máxima en el centro del muro respecto a los otros muros ensayados debido a que su rigidez es mayor

Finalmente, al analizar los resultados obtenidos cuando la barra se encuentra desplazada hacia la cara de las tensiones, se observa un aumento considerable de la capacidad del muro, lo cual se debe a que el brazo de momento es mayor generando mayor capacidad.

Adicionalmente, la capacidad del muro es mayor cuando la barra se encuentra traslapada si se compara con el resultado obtenido cuando la barra de GFRP es continua, por lo tanto, se concluye que el traslapo influye en el aumento de la capacidad del muro y la simulación de este “error” en obra no afectaría la capacidad del muro, pero si se llegara a presentar el desplazamiento hacia el lado contrario es decir el lado de las compresiones, si se vería afectada su capacidad estructural.

A continuación, a modo de ejemplo, se presenta la curva de Carga Vs. Deflexión en el centro de la altura, obtenidos para el Muro 9 (4-1500-C-T-1,15-A); graficados para cada ciclo de carga y descarga.

Las curvas de Carga Vs. Deflexión, incluyendo cada uno de los ciclos de carga y descarga, deflexión residual del muro, para cada uno de los muros ensayados, se encuentran consignadas en el **Anexo B**.



Gráfica 5-1 Carga Vs. Deflexión Típica en los Muros de Mampostería Reforzada con GFRP

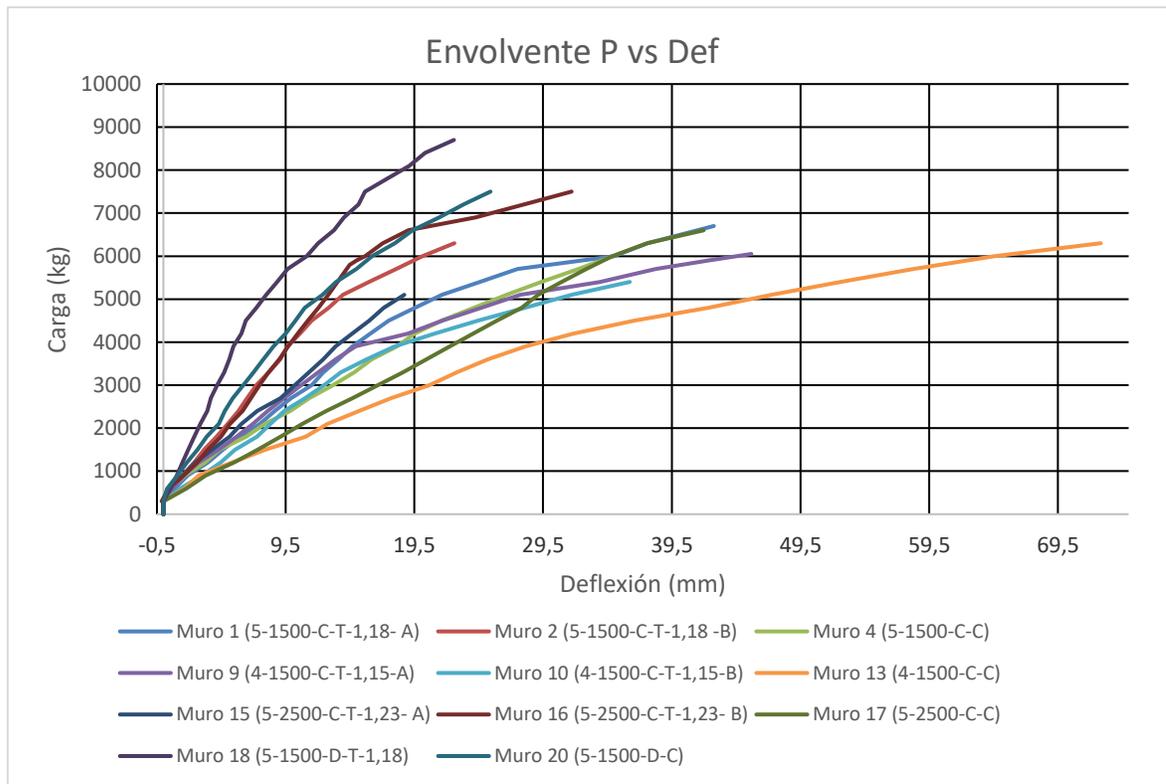
Las deflexiones experimentadas por los muros ensayados no fueron permanentes durante los procesos de carga y descarga ya que se observó que regresaban aproximadamente a los puntos iniciales, la razón principal de este comportamiento es que las barras de GFRP no presentan una zona plástica y su comportamiento es completamente elástico hasta llegar a la falla.

A continuación, en la Gráfica 5-2 Carga Vs. Deflexión Muros GFRP y en la **Gráfica 5-3 Momento vs Desplazamiento en el centro del muro**, se muestran las curvas de los muros reforzados con GFRP, donde se puede observar:

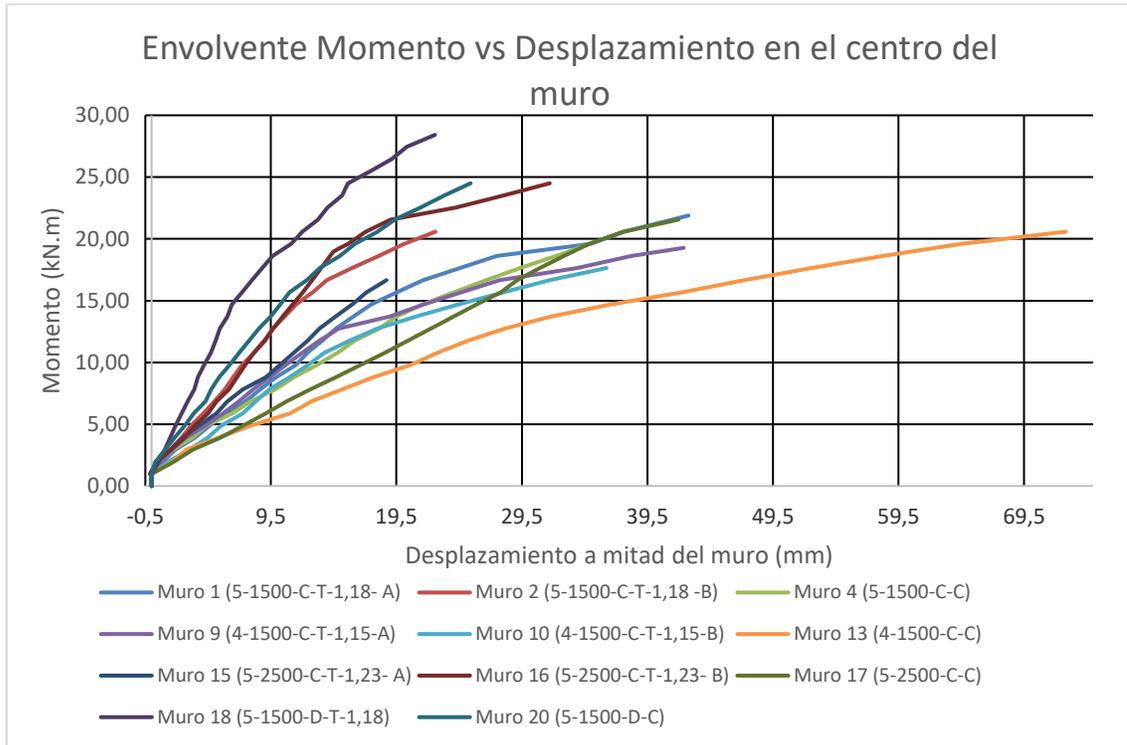
- Carga de falla
- Momento máximo
- Deflexión máxima

El comportamiento fue el esperado, en los puntos donde cambian las pendientes es atribuible al primer agrietamiento del muro. Después de presentarse los agrietamientos, las pendientes de las curvas continúan constantes, esto se debe a que las barras de refuerzo permanecen en su zona elástica hasta la falla; no se evidencia plastificación.

Como se puede observar en la Gráfica 5-2, el muro 13 presenta una mayor deflexión que los otros, esto se debe posiblemente a que su refuerzo es una barra #4 continua lo que le permite al muro soportar mayores deformaciones y como resultado su pendiente en la gráfica P vs Deflexión sea menor. Caso contrario ocurre con el muro 18 el cual soporta más carga debido a que su refuerzo se encuentra desplazado hacia la cara de las tensiones, por lo que este desplazamiento de la barra de refuerzo genera que sus deflexiones sean menores a las esperadas.



Gráfica 5-2 Carga Vs. Deflexión Muros GFRP



Gráfica 5-3 Momento vs Desplazamiento en el centro del muro

El modo típico de falla para los muros reforzados con GFRP, tal como se esperaba fue por aplastamiento en la mampostería en la mayoría de los ensayos



Fotografía 5-3 Falla a Compresión muro 4-1500-C-T-1,15-B.



Fotografía 5-4 Falla a Compresión muro 5-1500-C-T-1,18 -B.



Fotografía 5-5 Falla a Compresión muro 5-2500-C-T-1,23- A.

Las fisuras que se presentaron en la cara a tensión de los muros fueron horizontales tal como se ve en la Fotografía 5-6. En ningún muro se presentó falla en las barras de FRP

por tensión ya que la falla se producía en el mortero de pega como se puede ver en la
Fotografía 5-7



Fotografía 5-6 Falla a Tensión muro 5-2500-C-T-1,23- B.



Fotografía 5-7 Falla del mortero de pega en la cara a Tensión del muro 1500-C-T-1,18- A.

En el siguiente capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos comparados con los resultados esperados.

5.2 Análisis de resultados

Se realizó una comparación de los momentos teóricos vs los momentos experimentales y de las deflexiones teóricas vs las deflexiones experimentales de los muros, las cuales se relacionan a continuación en la **Tabla 5-2**. Los resultados ideales son aquellos en los cuales los momentos máximos experimentales son mayores a los momentos máximos teóricos.

Tabla 5-2 Relación entre Capacidad Teórica y Capacidad Experimental de los Muros, Deflexiones esperadas y experimentales de los muros.

NOMBRE INICIAL	NOMBRE FINAL	ϕ Barra	M_{exp}	$M_{teórico}$	$M_{teo}/$	Pfalla	δ_{max}	δ_{max}	$\delta_{teo}/\delta_{exp}$
			KN.m	KN.m	M_{exp}		KN	mm	
M1	5-1500-C-T-1,18- A	#5	22,88	16,76	0,73	68,29	45	34	0,75
M2	5-1500-C-T-1,18- B	#5	21,28	16,76	0,79	63,54	27	34	1,25
M4	5-1500-C-C	#5	20,32	16,76	0,82	60,67	41	34	0,83
M9	4-1500-C-T-1,15-A	#4	20,20	14,13	0,70	60,29	51	39	0,77
M10	4-1500-C-T-1,15-B	#4	18,23	14,13	0,78	54,43	43	39	0,91
M13	4-1500-C-C	#4	20,89	14,13	0,68	62,35	81	39	0,48
M15	5-2500-C-T-1,23- A	#5	21,55	21,14	0,98	64,33	28	50	1,78
M16	5-2500-C-T-1,23- B	#5	25,40	21,14	0,83	75,81	37	50	1,34
M17	5-2500-C-C	#5	21,88	21,14	0,97	65,32	50	50	0,99
M18	5-1500-D-T-1,18	#5	29,31	16,76	0,57	87,49	28	35	1,26
M20	5-1500-D-C	#5	25,69	16,76	0,65	76,70	33	35	1,07

*Cada muro esta reforzado con dos barras de GFRP

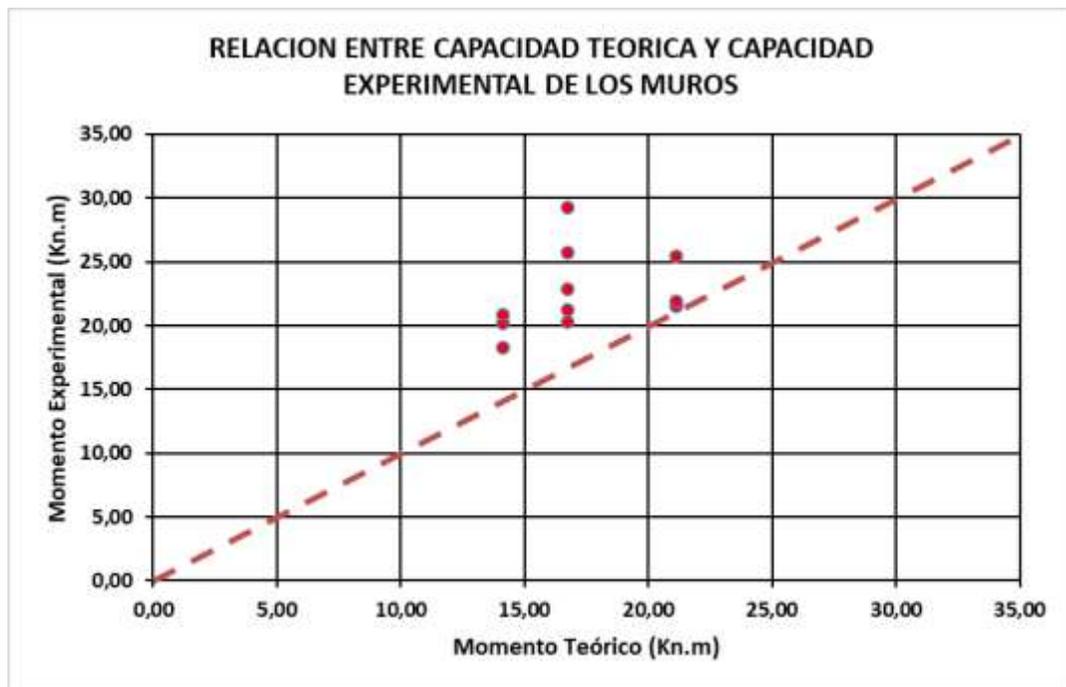
* δ : Deflexión

En el muro que tiene la barra desplazada como una simulación de error en la obra, se comparó con el muro de las mismas propiedades, pero cuyo refuerzo se encuentra centrado y se observó que el momento experimental es mayor tanto en el caso de la barra completa como en la barra traslapada, ambas desplazadas hacia la cara de las tensiones. El efecto que genera el traslape calculado para este muro (longitud de 1,18m) usando las ecuaciones del ACI 440 reforzado con barras #5 es un aumento en su capacidad respecto a la esperada de un 40% y en un 14% si se compara con los resultados obtenidos del muro con la barra continua.

Además, el uso de barras con traslapo en los muros con f'_m mayor trae como consecuencia una disminución en las deflexiones experimentadas por el muro si se compara los muros con menor f'_m ; pero a su vez los muros que tienen las barras traslapadas presentan un ligero aumento de su capacidad respecto a los muros que tienen las barras continuas, este efecto puede ser atribuido a que la longitud de traslapo usada (1.23m) es mayor y también a la diferencia de rigidez en los muros.

Otra conclusión que se puede obtener al observar los resultados de los ensayos es que la longitud de traslapo (1.15 m) usada en los muros reforzados con barras #4 tuvo una gran influencia en la capacidad ya que se obtuvieron resultados superiores en un 18% respecto a los esperados.

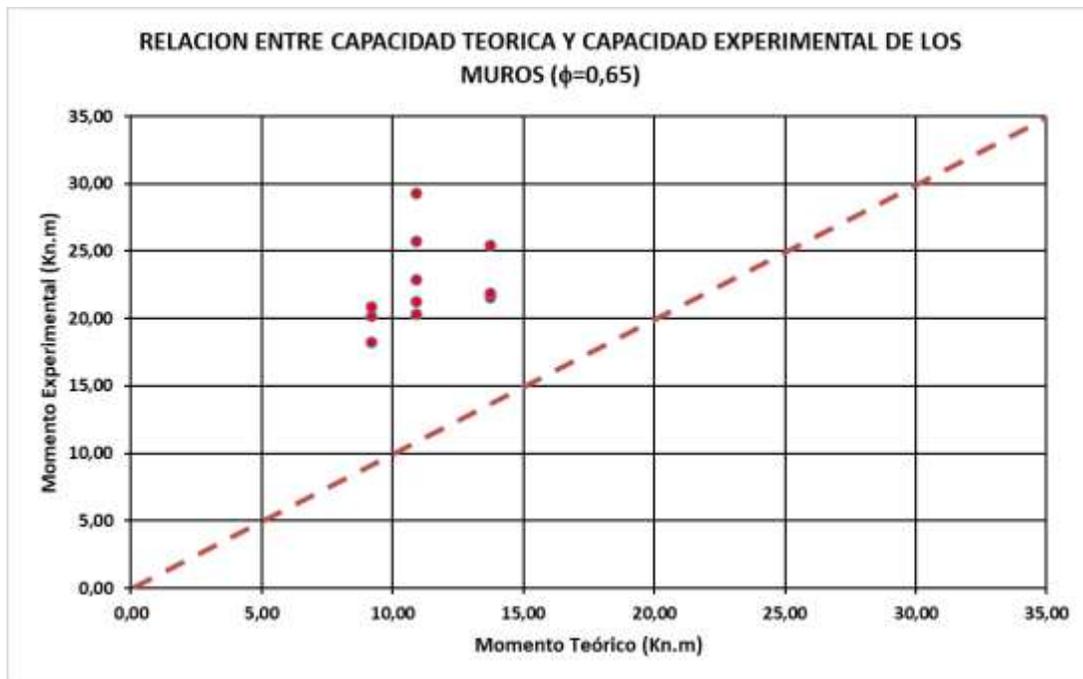
Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos en cuanto a las capacidades a flexión, en la siguiente gráfica se puede observar la relación entre momento teórico y momento experimental para cada uno de los muros, los momentos teóricos se ubican en las abscisas y los momentos experimentales se encuentran en las ordenadas.



Gráfica 5-4 Relación entre Capacidad Teórica y Capacidad Experimental de los Muros

Tal y como se observó en los resultados de las anteriores investigaciones presentadas en el estado del arte, los resultados que se encuentran por debajo de la línea naranja corresponden a los muros que no cumplen con la relación Momento teórico / Momento Experimental < 1 , esta relación es la esperada para que se cumplan las condiciones indicadas en el ACI 440.1R-15 y se satisfagan los resultados obtenidos por las ecuaciones allí presentes ya que se garantiza que el muro sea diseñado para solicitaciones menores a las que realmente puede soportar y de esta manera poder garantizar la seguridad del sistema.

Siguiendo las premisas de diseño presentadas en el marco teórico se aplicó el factor de reducción ϕ de 0.65 a la capacidad nominal a flexión, es decir a los momentos teóricos; lo anterior también se aplicó acuerdo con lo estipulado en el ACI 440, que establece aplicar esta reducción debido a una serie de incertidumbres como es el caso de las resistencias reales de los materiales, la posición del refuerzo, variación de las solicitaciones calculadas, entre otros. En la siguiente gráfica se muestran los resultados de los momentos máximos experimentales y los momentos máximos teóricos, afectando estos últimos por el factor ϕ .



Gráfica 5-5 Relación M teórico Vs M experimental con $\phi=0,65$

Como se puede observar en la gráfica, los resultados obtenidos usando barras traslapadas satisfacen los resultados esperados ya que al ser afectados los resultados teóricos por el coeficiente de reducción ϕ se garantiza que como se mencionó anteriormente, que en el diseño del elemento de mampostería en caso de presentarse una falla en su capacidad, la falla sea en la mampostería y no en la barra de GFRP ya que si eso sucediera se generaría una falla súbita sabiendo que el comportamiento de este material es completamente elástico.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En los muros ensayados, debido a que la cuantía de refuerzo fue mayor que la cuantía balanceada, el modo predominante de falla fue por aplastamiento en la mampostería como era esperado; además, se confirmó tal como se había afirmado en anteriores investigaciones que las capacidades calculadas teóricamente según los códigos TMS 402-16 y ACI 440.1R-15 se aproximan a las capacidades obtenidas experimentalmente por medio de los ensayos en el laboratorio.
- Las ecuaciones implementadas en la presente investigación para el cálculo de las longitudes de traslape de las barras de GFRP embebidas en concreto satisfacen los requerimientos estructurales de la mampostería construida con bloques de concreto al presentarse momentos experimentales mayores a los teóricos en los muros ensayados que contenían barras traslapadas.
- De acuerdo con lo que se esperaba, el desplazamiento del refuerzo hacia el lado de las tensiones generó un aumento en la capacidad a flexión del muro de mampostería superior al 25% con respecto a los muros con barras traslapadas y centradas, pero a su vez se presentan deflexiones menores a las esperadas.
- El traslape calculado con la metodología ACI 440 genera un aumento superior al 10% de la capacidad experimental respecto a la capacidad teórica de los muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP #5 y un aumento cercano al 10% en comparación con los muros que tienen las barras continuas, posiblemente atribuido a la mayor cantidad de refuerzo concentrado en el tramo central debido al traslape de las barras.

- Se pudieron validar las ecuaciones planteadas en las investigaciones anteriores en cuanto a la estimación de la capacidad teórica fuera del plano usando una relación de esbeltez diferente.
- Las capacidades que presentaron los muros reforzados con barras traslapadas fueron superiores a las presentadas por los muros con barras continuas, esto se debe posiblemente a la doble área de refuerzo concentrada en la zona de traslapo, este aumento de la capacidad contradice la idea de que el traslapo reduce la eficiencia del refuerzo.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda seguir estudiando las características estructurales de los elementos reforzados con GFRP, tomando como referencia los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas y de esta manera poder establecer guías de diseño para su implementación en la mampostería estructural.
- Se recomienda para investigaciones posteriores, trabajar con otras variables como diferentes diámetros de barra de GFRP y otro tipo de material de la mampostería.

7. ANEXOS

A. Anexo: Resultados de caracterización de los materiales

- Grout de relleno

GROUT BAJO											
	NOMBRE	Altura cm	DIÁMETRO cm		h/d	carga kg	kn	lbf	F.C	f _{cr} MPa	f _{cr} prom. MPa
MURETES DE PRUEBA	G-1	21,3	10,05	3,96	2,1	19863	194,789489	43.790	1	24,6	
	G-2	20,1	9,99	3,93	2,0	16380	160,632927	36.112	1	20,5	22,1
	G-3	19,5	10	3,94	2,0	16965	166,369817	37.401	1	21,2	
CILINDROS	M3-M4 (1)	19,9	10		2,0	26015,2			1	32,5	
	M3-M4 (2)	20,1	10		2,0	26848			1	33,5	
	M3-M4 (3)	20	10		2,0	26496			1	33,1	
	M3-M4 (4)	20,1	10		2,0	27688			1	34,6	
	M3-M4 (5)	19,9	10		2,0	24704			1	30,9	
	M3-M4 (6)	20	10		2,0	29104			1	36,4	
	M1-M2 (1)	20,1	10,1		2,0	24832			1	30,4	32,0
	M1-M2 (2)	20,1	10		2,0	24240			1	30,3	
	M1-M2 (3)	20,2	10,1		2,0	22152			1	27,1	
	M1-M2 (4)	20	10		2,0	24336			1	30,4	
	M1-M2 (5)	20,1	10		2,0	23264			1	29,1	
	M14 (1)	20,1	10		2,0	28000			1	35,0	
M14(2)	20,1	10		2,0	26056			1	32,5		
	NN (1)	19,9	10		2,0	24760			1	30,9	
	NN (2)	20	10		2,0	22744			1	28,4	30,3
	NN (3)	19,9	10		2,0	25152			1	31,4	
Muros de 20/12/2019	Ult FUND 1	20	10		2,0	23301			1	29,1	
	Ult FUND 2	20	10		2,0	21843			1	27,3	
	Ult FUND 3	20	10		2,0	22059			1	27,6	
	Ult FUND 4	20	10		2,0	25362			1	31,7	
	Ult FUND 5	20	10		2,0	23292			1	29,1	28,0
	Ult FUND 6	20	10		2,0	25011			1	31,2	
	Ult FUND 7	20	10		2,0	20376			1	25,5	
	Ult FUND 8	20	10		2,0	20376			1	25,5	
	Ult FUND 9	20	10		2,0	20331			1	25,4	
Promedio=										28,1	

GROUT ALTO											
NOMBRE	Altura cm	in.	DIÁMETRO cm		h/d	carga kg	kn	lbf	F.C	f'cr MPa	f'cr prom. MPa
G-4	20		10,05	3,96	2,0	21780	213,588837	48.017	1	26,9	
G-5	19,84		10,04	3,95	2,0	24669	241,920249	54.386	1	30,6	29,0
G-6	20,01		10,03	3,95	2,0	23877	234,153382	52.640	1	29,6	
2500 (1)	20	7,87	10	3,94	2,0	31680	310,674672	69.842	1	39,6	
2500 (2)	20	7,87	10	3,94	2,0	28872	283,137599	63.652	1	36,1	
2500 (3)	20	7,87	10	3,94	2,0	34452	337,858706	75.954	1	43,0	38,5
2500 (4)	20	7,87	10	3,94	2,0	29961	293,817041	66.053	1	37,4	
2500 (5)	20	7,87	10	3,94	2,0	29106	285,432355	64.168	1	36,4	
Promedio=										33,8	

• **Mortero de pega**

Mortero 1:3.0												
Dosificación	Cilindro	Altura, h		Diámetro, d		h/d	Carga			F.C	f _{cp} MPa	f _{cp} porm. MPa
		cm	cm	cm	in.		kg	kN	lbf			
Muretes	1	9,9	3,90	5,1	2,01	1,9	4848,4	47,5465619	10.689	1	23,3	22,2
	2	9,86	3,88	5,15	2,03	1,9	4360,5	42,7618973	9.613	1	20,5	
	3	9,85	3,88	5,17	2,04	1,9	4938,5	48,430141	10.888	1	23,1	
	4	9,71	3,82	5,12	2,02	1,9	4477,8	43,9122174	9.872	1	21,3	
	5	9,83	3,87	5,15	2,03	1,9	4880,7	47,8633167	10.760	1	23,0	
	6	9,83	3,87	5,15	2,03	1,9	4880,7	47,8633167	10.760	1	23,0	

Mortero 1:2.5												
Dosificación	Cilindro	Altura, h		Diámetro, d		h/d	Carga			F.C	f _{cp} MPa	f _{cp} porm. Mpa
		cm	cm	cm	in.		kg	kN	lbf			
Muretes	7	9	4,41	1,74	2,0	3668,4	35,9747149	8.087	1	23,6	23,4	
	8	9,16	4,4	1,73	2,1	2923,2	28,6667993	6.445	1	18,9		
	9	8,94	4,43	1,74	2,0	3843	37,686956	8.472	1	24,5		
	10	8,93	4,45	1,75	2,0	3853,8	37,7928678	8.496	1	24,3		
	11	9,1	4,4	1,73	2,1	4008,6	39,3109372	8.837	1	25,9		
	11	9,1	4,4	1,73	2,1	4008,6	39,3109372	8.837	1	25,9		

Mortero 1:2.5								
Dosificación	Cilindro	Altura, h cm	metr cm	h/d	Carga kg	f _{cp} MPa	f _{cp} porm. Mpa	
Muros	M1	9	4,4	2,0	5155,2	33,3	29,1	
	M2(1)	9	4,4	2,0	4179,6	27,0		
	M2(2)	8,9	4,5	2,0	4327,2	26,7		
	M3(1)	9,2	4,4	2,1	4561,2	29,4		
	M3(2)	9,3	4,4	2,1	4021,2	25,9		
	M3(3)	9,4	4,5	2,1	5391	33,3		
	M4(1)	9	4,4	2,0	4368,6	28,2		
	M4(2)	9,2	4,4	2,1	5050,8	32,6		
	M4(3)	9,1	4,3	2,1	5207,4	35,2		
	M1,60 (2)	9,1	4,5	2,0	4221	26,0		
	M1,60 (3)	9,1	4,5	2,0	4325,4	26,7		
	M1,60 (5)	9	4,5	2,0	4093,2	25,2		
	M1,60 (6)	9,2	4,4	2,1	4509	29,1		
	Promedio=							26,3

• Muretes

Muretes de prueba 1500 psi															
Descripción	Murete	Alto cm	Largo cm	Ancho cm	altoancho	F. C. NSR- 10	Área neta cm²	Carga			f'm				
								in2	kg	kN	lbF	MPa	psi	Mpa	psi
1:3 rellenos	1	60,3	39	19	3,2	1,08	742,07	115,0	82524	809,3	181,934	11,78	1.582	11,8	1708
	2	60,3	39	19	3,2	1,08	741,63	115,0	86209	845,4	190,068	12,31	1.653	12,3	1786
	3	60,5	39	19	3,2	1,08	741,82	115,0	89752	880,2	197,889	12,81	1.721	12,8	1859
1:3 vacios	4	59,2	39	19	3,1	1,08	403		50850					13,4	1938
	5	59,3	39	19	3,1	1,08	403		47200					12,4	1799
	6	59,5	39	19	3,1	1,08	403		45771	845,0	189,954	12,30	1.652	11,9	1722
									35,4	7,968	0,52	70		12,4	1802
									4,2	4,2	4,2	4,2			

Muretes de prueba 2500 psi															
Descripción	Murete	Alto cm	Largo cm	Ancho cm	altoancho	F. C. NSR- 10	Área neta cm²	Carga			f'm				
								in2	kg	kN	lbF	MPa	psi	Mpa	psi
1:2,5 rellenos	1	60,3	39	19	3,2	1,08	742,65	115,1	126325	1238,8	278,499	18,02	2.419	18,0	2613
	2	60,3	39	19	0,0	1,08	740,52	114,8	125720	1232,9	277,165	17,98	2.415	18,0	2608
	3	60,3	39	19	3,2	1,08	741,87	115,0	124762	1223,5	275,063	17,81	2.392	17,8	2584
1:2,5 rellenos	4	59,2	39	19	3,1	1,08	403		79109					20,8	3016
	5	59,3	39	19	3,1	1,08	403		74713					19,6	2848
	6	59,5	39	19	3,1	1,08	403		76068	1231,7	276,906	17,94	2.409	20,0	2900
									7,7	1,737	0,11	15		19,0	2761
									0,6	0,6	0,6	0,6			

Muretes de prueba 2500 psi															
Descripción	Murete	Alto cm	Largo cm	Ancho cm	altoancho	F. C. NSR- 10	Área neta cm²	Carga			f'm				
								in2	kg	kN	lbF	MPa	psi	Mpa	psi
1:2,5 rellenos	1	60,3	39	19	3,2	1,08	742,65		151473					21,6	3133
	2	60,3	39	19	3,2	1,08	741,87		138624					19,8	2871
											PROMEDIO=				
											20,7				
											3002				

Una vez obtenidos los resultados de la resistencia de los materiales se calculó la resistencia de la mampostería mediante el método de la correlación usando las siguientes ecuaciones:

Ecuación 21

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

Ecuación 22

$$f'_m = 0.75 [rR_m + 0.9k_r(1-r)f'_{cr}] \leq 0.94R_m$$

MUROS 1:3 (para f'm de 1500 psi)	
resistencia a la compresión de la unidad sobre área neta, f'cu=	16,70 MPa
resistencia a la compresión mortero de pega, f'cp=	22,20 MPa
resistencia a la compresión mortero de relleno, f'cr=	28,10 MPa
altura de la unidad en mm, h=	190,00 mm
factor de corrección por absorción de la unidad, kp=	1,4
factor de corrección por absorción de la unidad inyectada, kr=	0,9
Área Neta, AN=	40300,00 mm ²
Área Bruta, AB=	74100,00 mm ²
relación entre el área neta y el área bruta, r=	0,543859649
Rm1=	12,25 MPa
Rm2=	13,36 MPa
Rm=	12,25 MPa
Resistencia para celdas vacías, f'm=	9,186046512 (1331,98 psi)
f'm1=	12,78 MPa
f'm2=	11,51 MPa
Resistencia para celdas rellenas, f'm=	11,51 MPa (1669,41 psi)

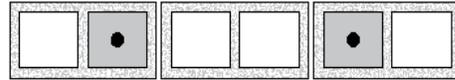
Muros 1:2,5 (para f'm de 2500 psi)	
resistencia a la compresión de la unidad sobre área neta, f'cu=	16,70 MPa
resistencia a la compresión mortero de pega, f'cp=	26,30 MPa
resistencia a la compresión mortero de relleno, f'cr=	33,80 MPa
altura de la unidad en mm, h=	190,00 mm
factor de corrección por absorción de la unidad, kp=	1,4
factor de corrección por absorción de la unidad inyectada, kr=	0,9
Área Neta, AN=	40300,00 mm ²
Área Bruta, AB=	74100,00 mm ²
relación entre el área neta y el área bruta, r=	0,543859649
Rm1=	12,69 MPa
Rm2=	13,36 MPa
Rm=	12,69 MPa
Resistencia para celdas vacías, f'm=	9,519767442 (1380,37 psi)
f'm1=	14,54 MPa
Resistencia para celdas rellenas, f'm=	14,54 MPa (2108,82 psi)

B. Anexo: Resultados de los ensayos de muros

RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-1500-C-T-1,18-A (M1)

1. Disposición del refuerzo

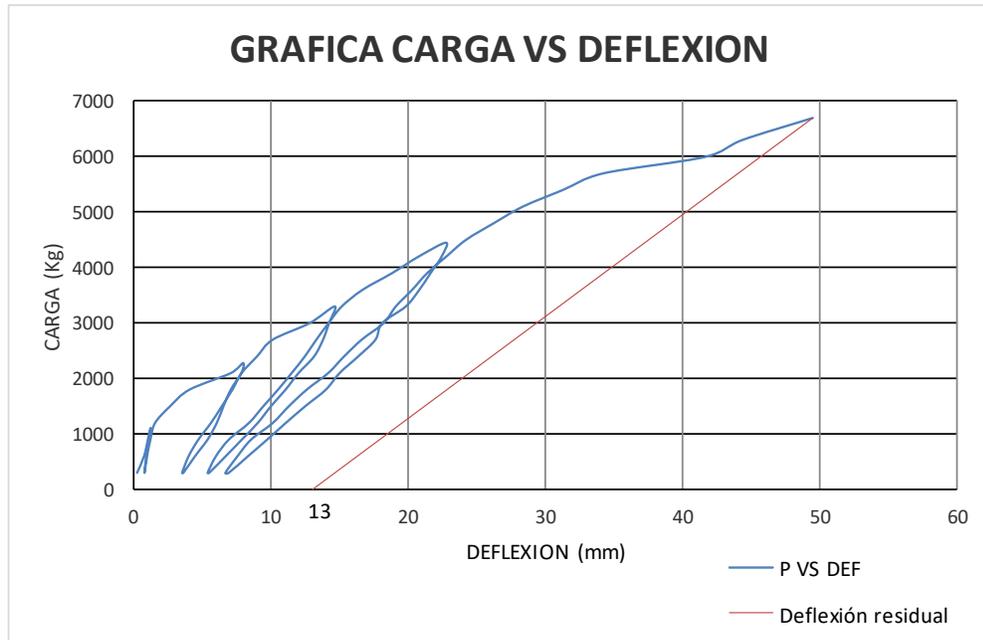
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Traslapada



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	68,29	KN
Momento Máximo	22,88	KN.m
Deflexión Máxima	45,00	mm
Deflexión Residual	13,00	mm

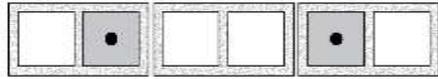
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-1500-C-T-1,18-B (M2)

1. Disposición del refuerzo

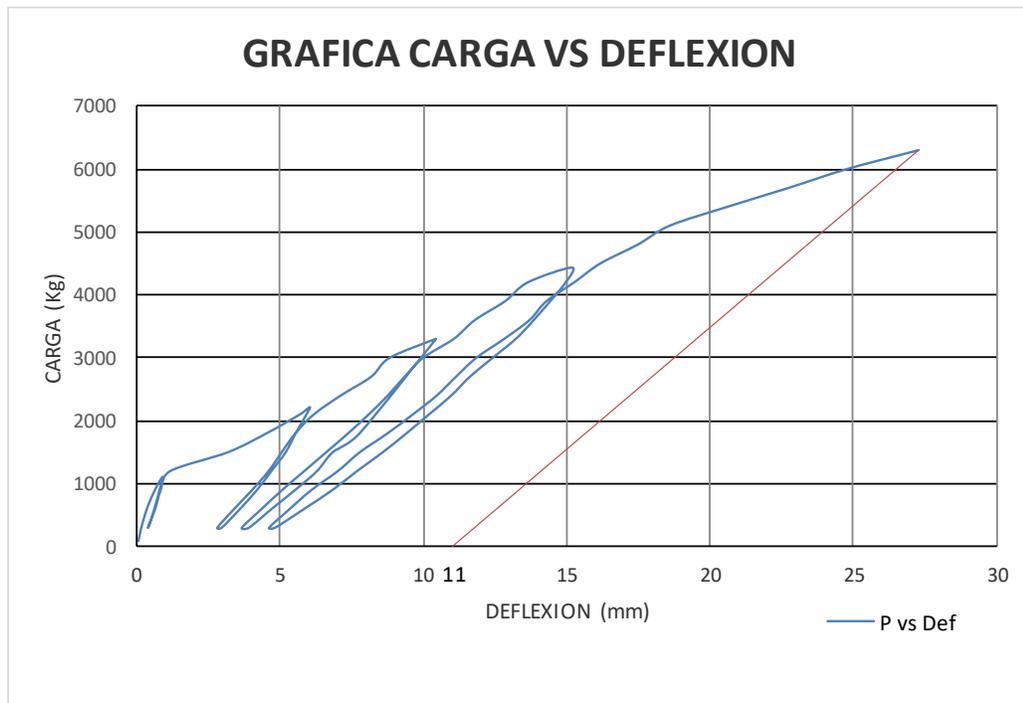
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Traslapada



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	64,54 KN
Momento Máximo	21,28 KN.m
Deflexión Máxima	27,00 mm
Deflexión Residual	11,00 mm

3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-1500-C-C (M4)

1. Disposición del refuerzo

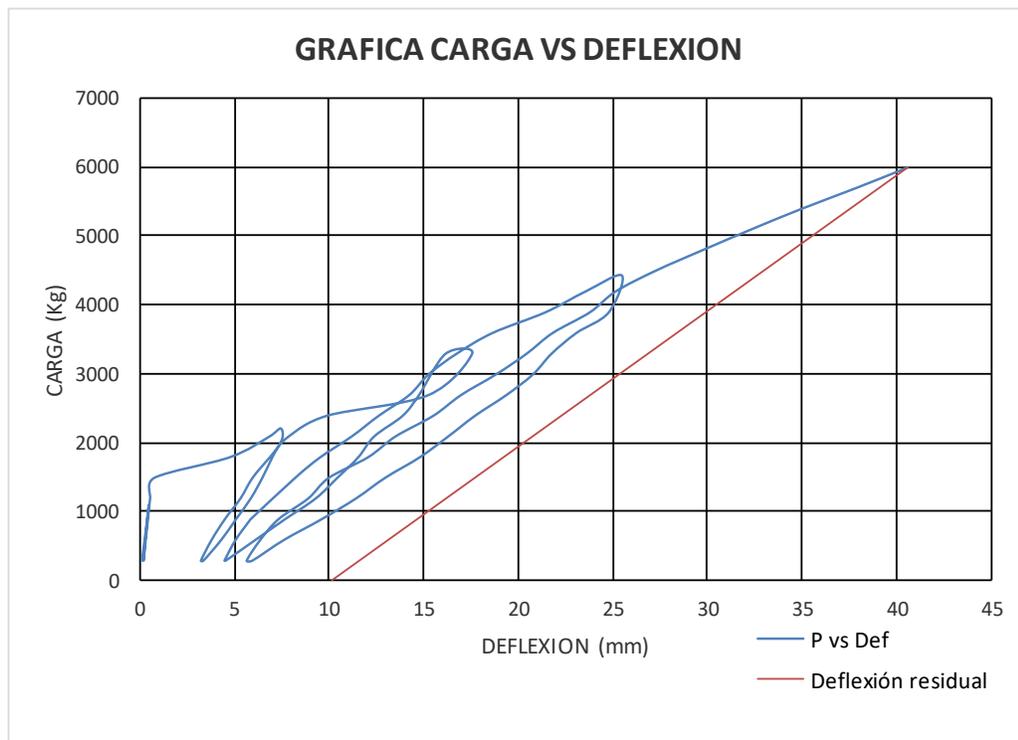
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Completa



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	60,67 KN
Momento Máximo	20,32 KN.m
Deflexión Máxima	41,00 mm
Deflexión Residual	10,00 mm

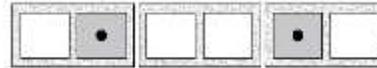
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 4-1500-C-T-1,15-A (M9)

1. Disposición del refuerzo

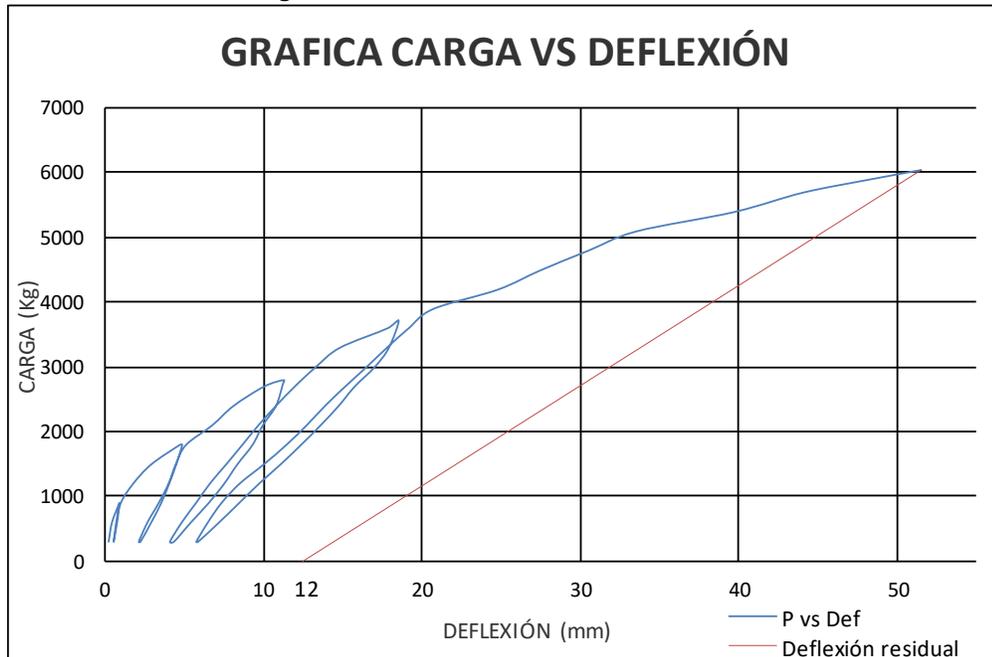
Cantidad barras	2
# barra	4
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Traslapada



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	60,29 KN
Momento Máximo	20,20 KN.m
Deflexión Máxima	51,45 mm
Deflexión Residual	12,00 mm

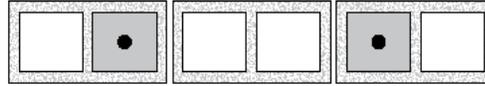
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 4-1500-C-T-1,15-B (M10)

1. Disposición del refuerzo

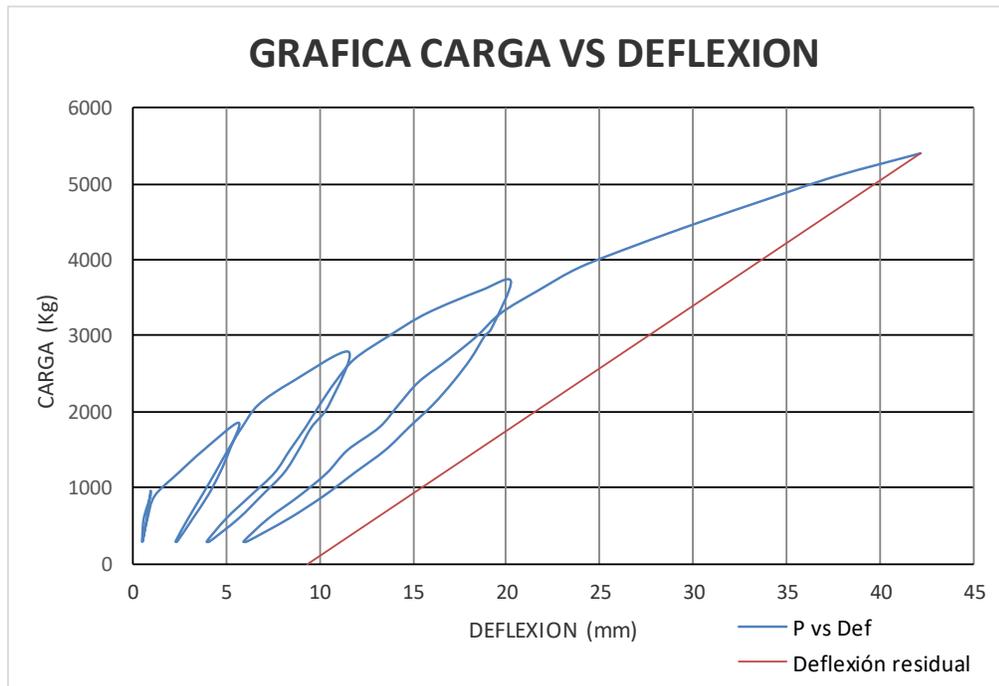
Cantidad barras	2
# barra	4
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Traslapada



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	54,43 KN
Momento Máximo	18,23 KN.m
Deflexión Máxima	43,00 mm
Deflexión Residual	9,37 mm

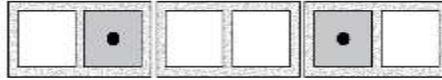
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 4-1500-C-C (M13)

1. Disposición del refuerzo

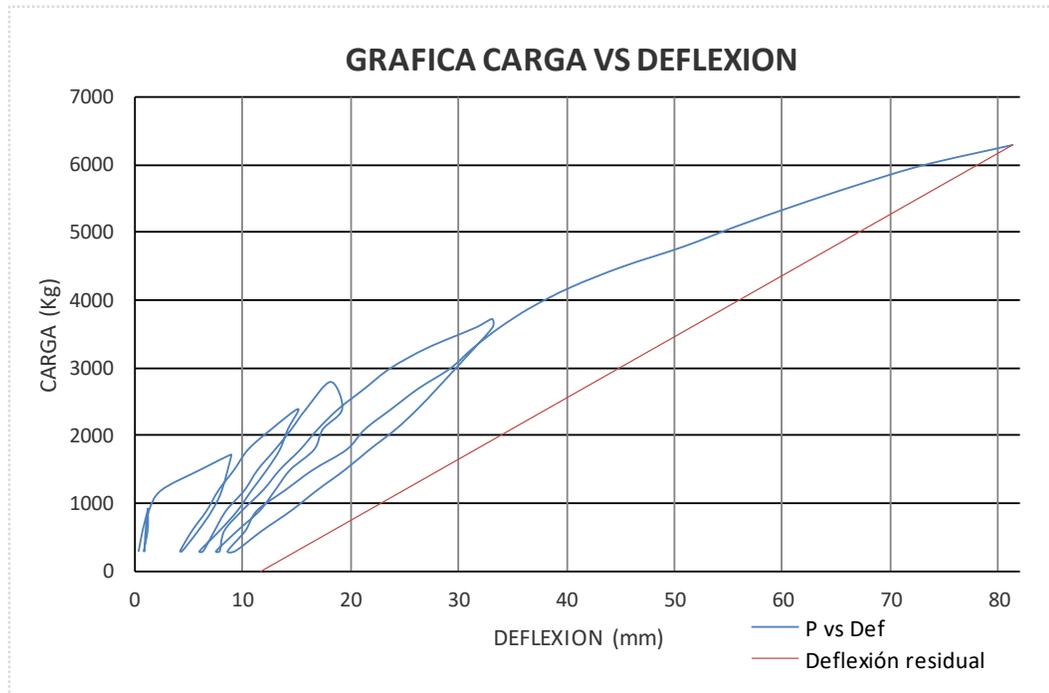
Cantidad barras	2
# barra	4
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Completa



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	62,35	KN
Momento Máximo	20,89	KN.m
Deflexión Máxima	81,00	mm
Deflexión Residual	20,00	mm

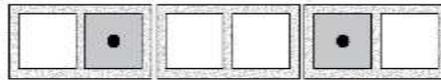
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-2500-C-T-1,23-A (M15)

1. Disposición del refuerzo

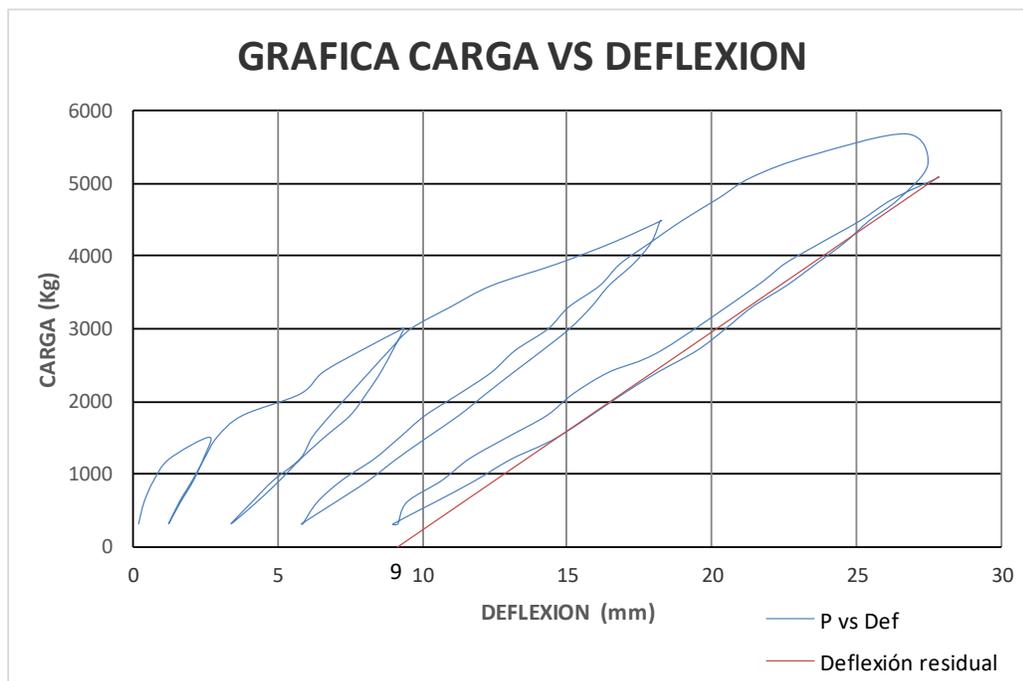
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Traslapada



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	64,33	KN
Momento Máximo	21,55	KN.m
Deflexión Máxima	28,00	mm
Deflexión Residual	9,14	mm

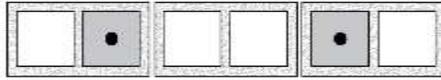
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-2500-C-T-1,23-B (M16)

1. Disposición del refuerzo

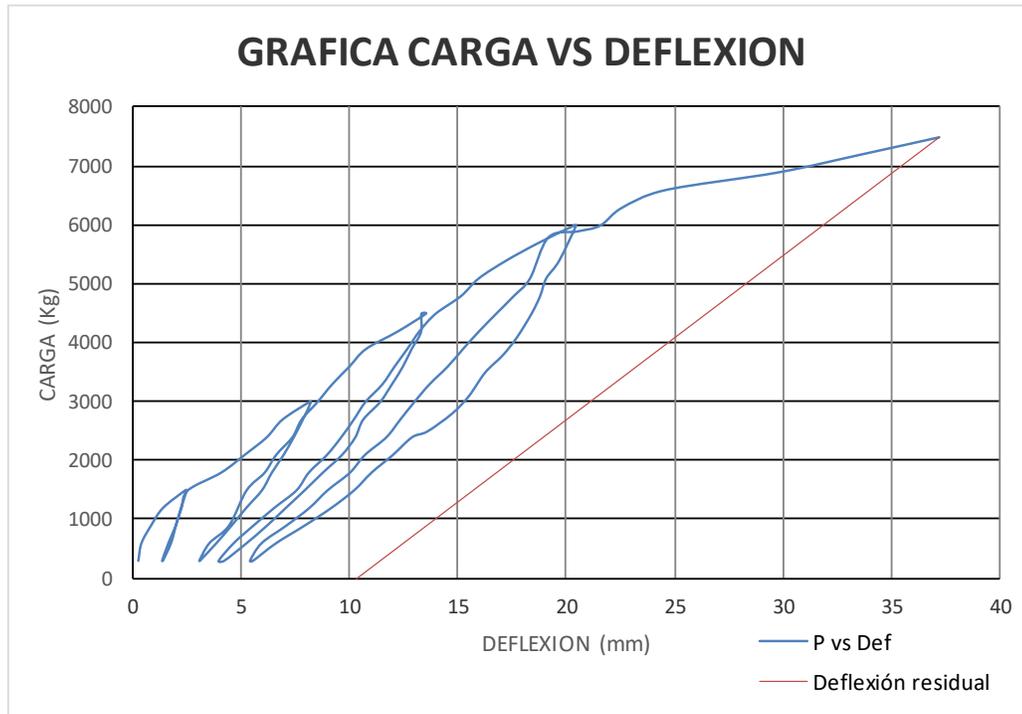
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Traslapada



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	75,81	KN
Momento Máximo	25,40	KN.m
Deflexión Máxima	37,26	mm
Deflexión Residual	10,32	mm

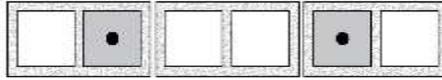
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-2500-C-C (M17)

1. Disposición del refuerzo

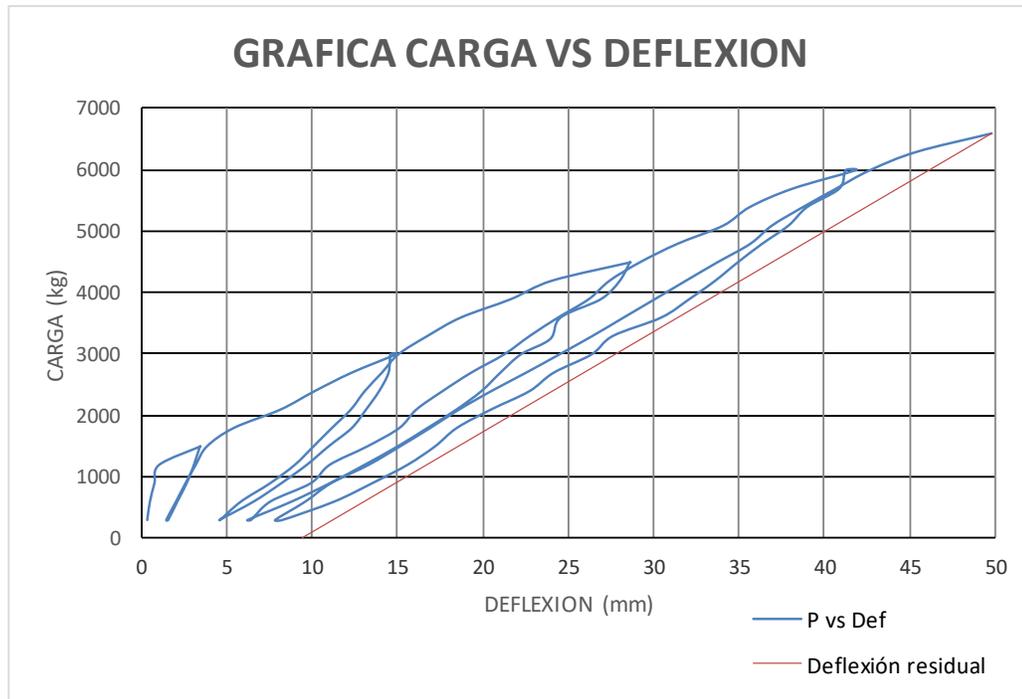
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Centrada
Completa/Traslapada	Completa



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	65,32 KN
Momento Máximo	21,88 KN.m
Deflexión Máxima	49,78 mm
Deflexión Residual	9,42 mm

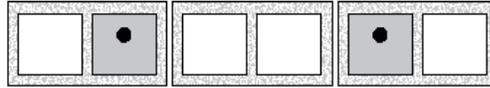
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-1500-D-T-1,18 (M18)

1. Disposición del refuerzo

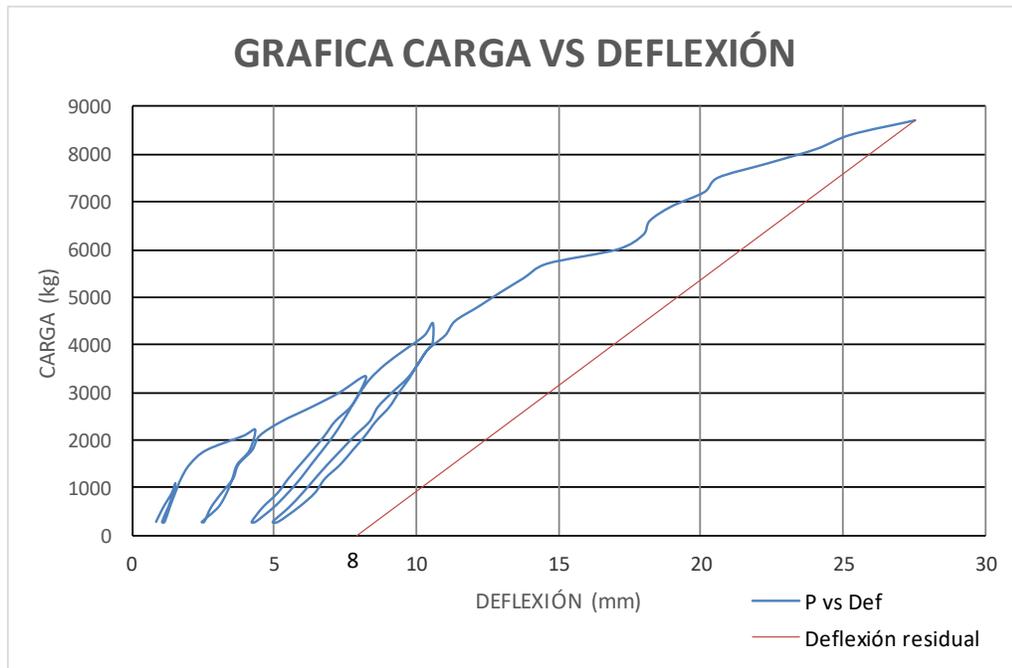
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Desplazada
Completa/Traslapada	Traslapada



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	87,49 KN
Momento Máximo	29,31 KN.m
Deflexión Máxima	28,00 mm
Deflexión Residual	7,92 mm

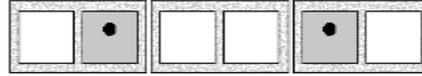
3. Gráfica ciclos de carga



RESULTADOS DE ENSAYO MURO 5-1500-D-C (M20)

1. Disposición del refuerzo

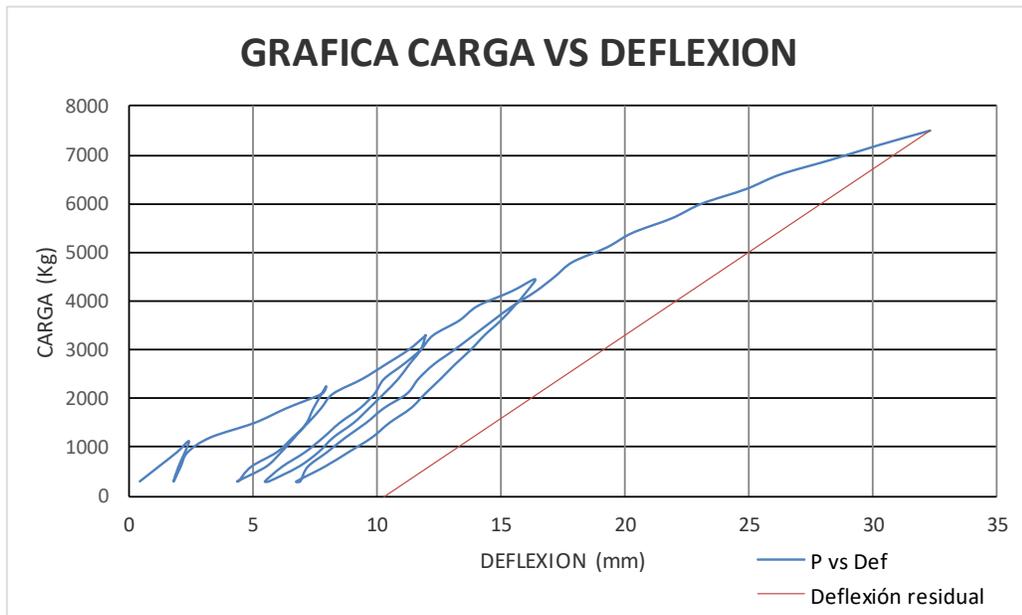
Cantidad barras	2
# barra	5
Centrada/Desplazada	Desplazada
Completa/Traslapada	Completa



2. Resultados experimentales

Carga Máxima	76,70	KN
Momento Máximo	25,69	KN.m
Deflexión Máxima	33,00	mm
Deflexión Residual	11,00	mm

3. Gráfica ciclos de carga



8. Bibliografía

- [1] F. J. Luis, I. del C. D. Perez, and H. W. Rivas, "Empleo de polímero reforzado con fibras de vidrio como refuerzo interno en estructuras hormigón," *Pedagog. Prof.*, vol. 13, no. April, p. 20, 2018.
- [2] A. M. Herrera Castro, "Comportamiento a Cortante de Muros de Mampostería de Concreto, Reforzados Internamente con Barras de GFRP, Sujetos a Cargas en el Plano.," 2019.
- [3] A. Gaytan Covarrubias, "Compuestos Frp Para La Construcción." [Online]. Available: <http://www.imcyc.com/cyt/septiembre03/compuestos.htm>.
- [4] L. A. Quintana Ruiz, "Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP.," 2017.
- [5] D. Otalora Barros, "Comportamiento Ante Carga Perpendicular al Plano, de Muros de Mampostería en Concreto, Reforzados con Barras de FRP.," 2017.
- [6] A. C. I. Committee, *ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars.* .
- [7] A. colombiana de ingeniería sísmica- AIS, "Titulo D - Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10," *Scielo*, p. 84, 2010.
- [8] Corona, "Especificaciones Corona," 2015. [Online]. Available: <https://s3.amazonaws.com/static.corona.co/uploads/ft-morteros-de-inyeccion-fino-grouting-.pdf>.
- [9] R. Castillo, "Uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo de elementos de concreto de puentes en Costa Rica," 2010.
- [10] T. M. Society, *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures.* 2016.
- [11] I. Tecnológico and D. C. Rica, "Análisis comparativo de muros de mampostería reforzada con y sin fibra de carbono," Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela de Ingeniería en Construcción, 2018.
- [12] J. T. Franco, "Arquitectura con bloques de cemento: ¿cómo construir con este material modular y de bajo costo?," 2018. [Online]. Available: <https://www.archdaily.co/co/889483/arquitectura-con-bloques-de-cemento-como-construir-con-este-material-modular-y-de-bajo-costo>.
- [13] A. M. Turing, "How Products Are Made." .
- [14] L. Gutierrez de Lopez, *Capítulo 3 Morteros Introducción.* 2003.
- [15] D. A. Laird, R. G. Drysdale, D. W. Stubbs, G. R. Sturgeon, U. of Calgary, and C. M. D. Centre, "The NEW CSA S304.1-04 'Design Of Masonry Structures,'" in *CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM*, 2005, pp. 1–14.
- [16] A. C. I. Committee 530, "ACI," 2013.
- [17] J. R. S., A. A. Ch, and P. M. C, "Desarrollo y aplicaciones de las barras de fibra de vidrio como armadura en estructuras de hormigón," *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, 2011. [Online]. Available: <file:///E:/TESIS II/DOCUMENTOS BASE/Desarrollo y aplicaciones de las barras de>

- fibra de vidrio como armadura en estructuras de hormigón - Dialnet.html.
- [18] K. Roanne D., "Evaluation of Required Splice Lengths for Reinforcing Bars in Mansory Wall Construction," 2014.
- [19] R. U. H. Zamora, "Comportamiento de Muros de Mampostería de Block Hueco Sujeto a Cargas Laterales, Reforzado con Varillas de Fibra de Vidrio en las Juntas de Mortero," Universidad Autónoma de Queretano, 2013.
- [20] A. Nanni, "Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement," *J. Struct. Eng.*, vol. 1, no. Noviembre, pp. 3344–3349, 1993.
- [21] Canadian Standards Association, "CSA S304 . 1-04," 2005.
- [22] A. C. de P. de Concreto, "Mampostería estructural_ El qué y el cómo _ ARGOS 360," 2010. [Online]. Available: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/mamposteria-estructural>.