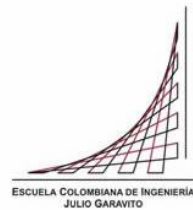


Maestría en Ingeniería Civil

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

Daniel Otálora Barros

Bogotá, D.C. 10 de julio de 2017



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

**Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Estructuras**

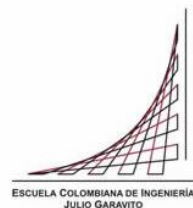
Nancy Torres Castellanos, PhD

Director

Gustavo Tumialán, PhD

Asesor

Bogotá, D.C. 10 de julio de 2017



La tesis de maestría titulada “Comportamiento Ante Carga Perpendicular al Plano, de Muros de Mampostería en Concreto, Reforzados con Barras de FRP”, presentada por Daniel Otálora Barros, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

Nancy Torres Castellanos. M.Sc, Ph.D
Director de la tesis

Carlos Eugenio Palomino Arias. M.Sc.
Jurado

Ismael Santana Santana. M.Sc.
Jurado

Bogotá, D.C., 10 de julio de 2017

Agradecimientos

A la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”, por permitirme participar en este tipo de proyectos de investigación e innovación, por el apoyo económico para la compra de materiales utilizados en el proyecto, por permitir usar los laboratorios y zonas de la universidad para la elaboración de las muestras y ejecución de los ensayos, por ayudarnos con el tiempo de los operarios de laboratorio para todo lo necesario en la investigación.

A la ingeniera Nancy Torres, quien fue la persona que tuvo la idea inicial del proyecto, quien me ha guiado, acompañado y apoyado constantemente en el desarrollo de la investigación y quien depositó en mí su confianza, incluyéndome como colaborador en esta tesis.

Al ingeniero Gustavo Tumialán, miembro del comité ACI 440, por su constante e incondicional colaboración por medio de aportes técnicos durante todo el desarrollo del proyecto.

A las empresas Kreato, Hilti y Sika por la donación de materiales necesarios para la construcción de las muestras a ensayar.

A Jorge Padilla Ingeniería, empresa donde trabajo, por todo el apoyo en conceptos técnicos y tiempo necesario para la ejecución de la investigación.

A los jurados por su valioso tiempo empleado en la revisión. Por sus acertadas observaciones y comentarios que ayudaron a mejorar la versión final del documento.

Por último y no menos importante, a mi familia por el apoyo económico y comprensión en el tiempo dedicado a este trabajo.

Resumen

Los polímeros reforzados con fibras – FRP “*Fiber Reinforced Polymers*” –, han surgido desde la década del noventa del siglo pasado, como una alternativa de reforzamiento de estructuras. Tienen a su favor, alta resistencia a la tensión, alta resistencia a la corrosión y no tiene conductividad; su diseño se basa en la capacidad ante cargas gravitacionales y aún no ha sido aceptado para reforzar estructuras que están sometidas a fuerzas sísmicas.

En EEUU el comité ACI 440, especifica las guías de diseño, relacionadas con el reforzamiento tanto interno como externo de estructuras considerando como material de reforzamiento el FRP, tanto en su presentación de barras como de bandas; es así como la guía ACI 440.1R-15, “*Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*” presenta las recomendaciones para el diseño de estructuras nuevas en concreto con refuerzo interno en barras de FRP. Por otro lado, en lo relacionado con la mampostería, la guía ACI.440.7R-10 “*Guide For The Design And Construction Of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Systems For Strengthening Unreinforced Masonry Structures*” define los criterios para el diseño de mampostería reforzada externamente con bandas de FRP; evidenciando la no existencia de una normativa para diseñar mampostería reforzada internamente con barras de FRP.

Dado el vacío encontrado en las guías del ACI internacional en lo referente al uso de barras de FRP como refuerzo interno de muros de mampostería y dadas las amplias ventajas que ofrecería su uso, se planteó un programa experimental macro, donde inicialmente se realizaría una primera investigación para evaluar la capacidad ante cargas perpendiculares al plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP, con el fin de generar un protocolo de diseño preliminar para evaluar la capacidad teórica de dichos muros, tomando como base los requisitos especificados en el: ACI 440.1R-15 y el código que especifica los requerimientos para el diseño de Estructuras de Mampostería, TMS 402-16 “*Building Code Requirements for Masonry Structures*”.

Dentro del programa experimental, se construyeron y ensayaron 16 muros de mampostería en concreto distribuidos así: 2 reforzados con acero convencional y 14 reforzados con FRP. La longitud de los muros varió desde 1.0 m hasta 1.8 m, con cuantías del 0.13% al 0.45%. El espesor de los muros fue de 14 cm y el alto de 220 cm.

Se midieron deformaciones unitarias en las barras de refuerzo mediante galgas e igualmente se registraron las deflexiones en la mitad de la altura de los especímenes mediante LVDT – “*Linear Variable Differential Transformer*” –.

Haciendo una relación entre los datos teóricos y experimentales, de la capacidad a flexión de los muros, se encontró que esta relación fue mayor a 1.0 para los muros de menores cuantías de refuerzo y mayores separaciones entre barras. Se pudo observar que para un desplazamiento límite en la mampostería de $0.007h$ en muros reforzados con acero, los muros reforzados con FRP permitían un desplazamiento máximo de $0.018h$.

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 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.

Abstract

Fiber Reinforced Polymers have emerged since the 1990s as an alternative to reinforcing structures. Have in their favor, high tensile strength, high modulus of elasticity, high corrosion resistance and no conductivity; its design is based on the capacity before gravitational loads and has not yet been accepted to reinforce structures that are subjected to seismic forces. In the USA, the ACI 440 committee specifies the design guidelines related to the internal and external reinforcement of structures, considering the FRP as a material, both in its presentation of bars and bands; this is how ACI Guide 440.1R-15, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars" presents the recommendations for the design of new concrete structures with internal reinforcement in FRP bars. On the other hand, in relation to the masonry, the guidebook ACI.440.7R-10 "Guide For The Design And Construction Of Externally Bonded Fiber Reinforced Polymer Systems For Strengthening Unreinforced Masonry Structures" defines the criteria for the design of externally reinforced masonry with bands of FRP; evidencing the nonexistence of a regulation to design reinforced masonry internally with FRP bars.

Given the gap found in the international ACI guidelines regarding the use of FRP rods as internal reinforcement of masonry walls and given the wide advantages that would be offered, a macro experimental program was generated, where an initial investigation would be carried out initially to evaluate the load capacity perpendicular to the plane of masonry walls reinforced internally with FRP bars and to generate a preliminary design protocol to evaluate the theoretical capacity of these walls, based on the requirements specified in: ACI 440.1R-15 and The code that specifies the requirements for the design of Masonry Structures, TMS 402-16 "Building Code Requirements for Masonry Structures".

Within the experimental program, 16 types of concrete masonry walls were constructed and tested, 2 reinforced with conventional steel and 14 reinforced with FRP. The length of the walls varies from 1.0 m to 1.8 m, with amounts ranging from 0.13% to 0.45%. The thickness of the walls was 14 cm and the height of 203 cm.

Unit deformations on the reinforcing bars were measured by gauges and the deflections were also recorded at half height of the specimens by LVDT - Linear Variable Differential Transformer.

By making a relation between the theoretical and experimental data, of the flexural strength of the walls, it was found that this ratio was greater than 1.0 for the walls of smaller amounts of reinforcement and greater separations between bars. It was observed that for a limit displacement in the masonry of $0.007h$ in walls reinforced with steel, the walls reinforced with FRP would allow a maximum displacement of $0.018h$.

The walls to be submitted to their maximum capacity presented a behavior of totally elastic and recoverable deflections, presenting the advantage of being able to be repaired because its reinforcement material does not present a zone of plasticity and its behavior is elastic until failure. The failure mode presented in the walls reinforced with FRP was by crushing in the masonry coinciding with the theoretical failure.

Índice General

	Pág.
Índice de Figuras	12
Índice de Fotografías	13
Índice de Tablas	15
Índice de Gráficas	16
Lista de Símbolos y Abreviaturas	17
Introducción	20
1. Marco de Referencia	24
1.1. Mampostería en Concreto	24
1.1.1. Bloque de mampostería	26
1.1.2. Mortero de pega	27
1.1.3. Mortero de inyección – “Grout” –	28
1.1.4. Acero de refuerzo	28
1.2. Refuerzo de FRP	28
1.3. Consideraciones de Análisis y Diseño	31
2. Estado del Arte	37
2.1. Anclaje de Barras de Refuerzo de GFRP para Ensayos a Tracción.	37
2.2. Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de las Barras de FRP. Nanni	38
2.3. Resistencia a la Flexión y Ductilidad de Muros de Mampostería en Concreto Reforzados con Barras de Acero. Triwiyono, Nugroho, et al.	42
2.4. Reforzamiento con Barras de FRP de Mampostería no Estructural Sometida a Cargas Fuera del Plano. Galati, Tumialán y Nanni.	46
3. Objetivos	49
3.1. Objetivo General	49
3.2. Objetivos Específicos	49
4. Programa Experimental	50
4.1. Caracterización de los Materiales	53
4.1.1. Mortero de pega	53
4.1.2. Mortero de relleno	53
4.1.3. Mampostería en concreto	53

4.1.4. Barras FRP	54
4.1.4.1 Barra GFRP	54
4.1.4.2 Barra CFRP	54
4.2. Construcción de los Muros	55
4.3. Diseño del Montaje para los Ensayos	57
4.4. Instrumentación Externa	58
5. Cálculo de Capacidad Resistente de los Muros	61
5.1. Protocolo de Carga	65
6. Resultados de los Ensayos	66
7. Análisis de los Resultados	71
8. Conclusiones y Recomendaciones	77
9. Bibliografía	80
Anexo A. Mortero de Pega	82
Anexo B. Mortero de Relleno	84
Anexo C. Barras FRP	86
a. Barra 1 GFRP	87
b. Barra 1 CFRP	88
Anexo D. Mortero Expansivo	92
Anexo E. Muretes de Mampostería en Concreto	96
a. Ensayo a Compresión Murete 1	99
b. Ensayo a Compresión Murete 2	100
c. Ensayo a Compresión Murete 3	101
d. Ensayo a Compresión Murete 4	102
Anexo F. Resultados de los Ensayos para Muros de Mampostería	104
a. Muro Tipo 1 GFRP	105
b. Muro Tipo 2 GFRP	106
c. Muro Tipo 3 GFRP	107
d. Muro Tipo 4 GFRP	109
e. Muro Tipo 6 GFRP	110
f. Muro Tipo 7 GFRP	112
g. Muro Tipo 8 CFRP	114
h. Muro Tipo 9 CFRP	115

i.	Muro Tipo 10 CFRP	116
j.	Muro Tipo 11 CFRP	117
k.	Muro Tipo 13 CFRP	118
l.	Muro Tipo 14 CFRP	120
m.	Muro Tipo 15 Acero	121
n.	Muro Tipo 16 Acero	122

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1 Configuración Geométrica Muros	51
Figura 2 Configuración del Refuerzo de los Muros	52
Figura 3 Esquema Montaje para Ensayos	57
Figura 4 Instrumentación Externa de Muros	59
Figura 5 Características Bloque 14 Kreato	98

Índice de Fotografías

	Pág.
Foto 1 Construcción de Mampostería en Concreto con Barras de FRP	21
Foto 2 Construcción de Mampostería en Concreto con Barras de FRP	21
Foto 3 Montaje de las Barras Antes del Ensayo	38
Foto 4 Detalle del Anclaje en el Extremo de las Barras	38
Foto 5 Detalle Muestras de FRP	39
Foto 6 Detalle de Daños en Barra de FRP Visto con el ME	40
Foto 7 Montaje para Ensayo Muro con Refuerzo Vertical	44
Foto 8 Montaje para Ensayo Muro con Refuerzo Horizontal	44
Foto 9 Detalle de Muro Reforzado	47
Foto 10 Montaje para Ensayo	47
Foto 11 Construcción Parcial de Muros	55
Foto 12 Construcción Final de Muros	55
Foto 13 Instrumentación de Galgas en Barras	56
Foto 14 Protección Galgas en Barras	56
Foto 15 Inyección de las Celdas	56
Foto 16 Vista General del Montaje	58
Foto 17 Ubicación LVDT Superior	59
Foto 18 Ubicación LVDT Intermedio	59
Foto 19 Ubicación LVDT Inferior	60
Foto 20 Ubicación Galga Electrónica en Muros	60
Foto 21 Plomada	60
Foto 22 Gato para Aplicar la Fuerza	60
Foto 23 Aplastamiento en la Mampostería	69
Foto 24 Aplastamiento en el Mortero de Pega	69
Foto 25 Fisuras Horizontales en el Mortero de Pega	70
Foto 26 Rotura en Barras FRP	70
Foto 27 Ensayo Cilindros Mortero de Pega	83
Foto 28 Falla Cilindros Mortero de Pega	83
Foto 29 Detalle Falla Cilindros Mortero de Relleno 1	85
Foto 30 Detalle Falla Cilindro Mortero de Relleno 2	85
Foto 31 Detalle Falla Cilindros Mortero de Relleno 3	85
Foto 32 Detalle Falla Cilindros Mortero de Relleno 4	85
Foto 33 Llenado de Anclajes con Mortero Expansivo	87
Foto 34 Ensayo Barras FRP	87
Foto 35 Detalle Falla a Tensión Barra GFRP	88
Foto 36 Detalle Falla a Tensión Barra GFRP	89
Foto 37 Muretes con Celdas Vacías y Llenas	97
Foto 38 Deflexión del Muro	108

Foto 39 Fisuras Según Cargas	111
Foto 40 Línea de Plomada Antes de Desplazamientos	111
Foto 41 Deflexión del Muro	111
Foto 42 Fisuras Según Cargas	113
Foto 43 Línea de Plomada Antes de Desplazamientos	113
Foto 44 Línea de Plomada Después de Cargas	113
Foto 45 Deflexión del Muro	113
Foto 46 Línea de Plomada Antes de Desplazamientos	115
Foto 47 Deflexión del Muro	115
Foto 48 Fisuras Según Cargas	119
Foto 49 Línea de Plomada Después de Cargas	119

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Resumen de los Muros del Programa Experimental	51
Tabla 2 Capacidades Teóricas de los Muros	64
Tabla 3 Resultados de los Ensayos	69
Tabla 4 Relación entre Capacidad Teórica y Capacidad Experimental de los Muros	71
Tabla 5 Relación entre Deformación Teórica y Deformación experimental de los Muros	74
Tabla 6 Resultados Ensayos Cilindros Mortero de Pega	83
Tabla 7 Resultados Ensayos Cilindros Mortero de Pega	85
Tabla 8 Resumen Resultado Ensayos Muretes	98
Tabla 9 Valores Máximos Experimentales MT1	105
Tabla 10 Valores Máximos Experimentales MT2	106
Tabla 11 Valores Máximos Experimentales MT3	107
Tabla 12 Valores Máximos Experimentales MT4	109
Tabla 13 Valores Máximos Experimentales MT6	110
Tabla 14 Valores Máximos Experimentales MT7	112
Tabla 15 Valores Máximos Experimentales MT8	114
Tabla 16 Valores Máximos Experimentales MT9	115
Tabla 17 Valores Máximos Experimentales MT10	116
Tabla 18 Valores Máximos Experimentales MT11	117
Tabla 19 Valores Máximos Experimentales MT13	118
Tabla 20 Valores Máximos Experimentales MT14	120
Tabla 21 Valores Máximos Experimentales MT15	121
Tabla 22 Valores Máximos Experimentales MT16	122

Índice de Gráficas

	Pág.
Gráfica 1 Carga Vs. Deflexión Típica en los Muros de Mampostería Reforzada con FRP	66
Gráfica 2 Deflexión Vs. Carga Muros GFRP	67
Gráfica 3 Deflexión Vs. Carga Muros CFRP	68
Gráfica 4 Relación entre Capacidad Teórica y Capacidad Experimental de los Muros	72
Gráfica 5 Relación entre Capacidad Teórica por ϕ y Capacidad Experimental de los Muros	73
Gráfica 6 Relación entre Deformación Teórica y Deformación Experimental de los Muros	75
Gráfica 7 Comparación de Momento Vs. Deflexión de Muro Reforzado con FRP y muros Reforzados con Acero	76
Gráfica 8 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 1	99
Gráfica 9 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 2	100
Gráfica 10 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 3	101
Gráfica 11 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 4	102
Gráfica 12 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT1	106
Gráfica 13 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT2	107
Gráfica 14 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT3	108
Gráfica 15 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT4	109
Gráfica 16 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT6	110
Gráfica 17 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT7	112
Gráfica 18 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT8	114
Gráfica 19 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT9	116
Gráfica 20 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT10	117
Gráfica 21 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT11	118
Gráfica 22 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT13	119
Gráfica 23 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT14	120
Gráfica 24 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT15	121
Gráfica 25 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT16	122

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A_b	Área de la barra	mm^2
A_f	Área de 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 con la sección agrietada del muro	mm^4
I_g	Inercia del muro	mm^4
L	Alto 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_1	Relación del promedio de esfuerzos del bloque de compresiones TMS 402-16	
β_1	Factor para calcular la altura del bloque de compresiones TMS 402-16	
δ	Deflexión máxima en el muro	mm
ϵ_{fu}	Deformación unitaria última de las barras de FRP	mm/mm
ϵ_{mu}	Deformación unitaria última de la mampostería	mm/mm
ϕ_d	Diámetro de la barra	mm
ϕ	Coeficiente 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
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
ASTM	American Society for Testing And Materials
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
ECI	Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Gravito”
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
ME	Microscopio Electrónico
MSJC	Masonry Standards Joint Committee
NSR	Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente
NTC	Norma Técnica Colombiana
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
TMS	The Masonry Society

Introducción

Los polímeros reforzados con fibras – FRP “*Fiber Reinforced Polymer*” por sus siglas en inglés – han surgido desde la década del noventa del siglo pasado, como una alternativa de refuerzo a los materiales tradicionales en estructuras existentes y nuevas. Aunque este material es relativamente más costoso en comparación con materiales tradicionales como el acero de refuerzo, los costos de mano de obra e instalación por lo general son más bajos (Nanni 1999). Adicionalmente tienen a su favor, alta resistencia a la tensión y alta resistencia a la corrosión. Pueden ser utilizados sin presentar conductividad en: salas de resonancia magnética, en estructuras cercanas a cables de alto voltaje y subestaciones con transformadores. Adicionalmente en estructuras que estén sometidas a ciclos de hielo y deshielo, dado que el refuerzo no presentará corrosión por las sales usadas para derretir el hielo, igualmente puede ser usado como refuerzo en estructuras que estén en contacto permanente con el mar, en plantas químicas, sótanos y en losas de puentes que estén sometidas exclusivamente a cargas gravitacionales; en la actualidad el uso de estas barras como refuerzo principal no está permitido para controlar fuerzas sísmicas, pero se siguen adelantando investigaciones con el fin de conocer su comportamiento y presentar especificaciones que permitan atender ese tipo de solicitudes.

En Colombia, en la actualidad ni el Título C, ni el Título D del Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10, cubre los diseños de concreto ni de muros de mampostería utilizando los FRP, sin embargo, en varios países dadas las ventajas que presentan estos materiales, se ha propagado su uso para el reforzamiento de algunos tipos de estructuras. El uso de los FRP ya está normalizado, en países como Canadá con el CAN/CSA S806 y en Estados Unidos con el comité ACI 440, donde se han desarrollado guías para su uso, entre ellas la guía ACI 440.1R-15, la cual tuvo su primera versión en el año 2002, y posteriormente se realizaron actualizaciones en el 2008 y el 2015; esta guía cubre el diseño de elementos de concreto reforzados con barras de FRP y es parte fundamental en el desarrollo de esta investigación.

En la actualidad, dentro de las guías de diseño ACI 440 aún no se ha incluido los requisitos para el uso de barras de FRP como refuerzo interno en mampostería nueva, no obstante, en algunas partes del mundo como se muestra en la Foto 1 y Foto 2, ya se han hecho diseños y se han construido estructuras utilizando las barras de FRP como refuerzo principal.



Foto 1 Construcción de Mampostería en Concreto con Barras de FRP



Foto 2 Construcción de Mampostería en Concreto con Barras de FRP

En Colombia, es frecuente el uso de la mampostería estructural para satisfacer las necesidades de la población, principalmente en edificaciones habitacionales, en muros de cerramiento, en muros de sótanos y en muros de contención. Como ya se mencionó, a nivel internacional y nacional, no se encuentra información sobre el diseño de reforzamiento de muros de mampostería con barras de FRP para estructuras nuevas y dados los beneficios que presenta en lo que se refiere a: baja densidad del material, alta relación entre su esfuerzo resistente y peso, alta resistencia a la corrosión, baja conducción térmica, nulo magnetismo, transparencia a las ondas de radar, aislantes, poco mantenimiento requerido, gran durabilidad y alta resistencia al impacto. Este material se puede utilizar idealmente en: plantas de procesos químicos, plantas de tratamiento de aguas residuales, instalaciones petroquímicas, plantas nucleares, instalaciones con resonancia magnética y estructuras en general que estén expuestas a agentes corrosivos.

Dadas estas múltiples ventajas, se evidenció la pertinencia de estudiar el comportamiento de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP; por lo tanto, en la Escuela Colombiana de Ingeniería, se planteó un programa experimental macro, donde inicialmente se evaluó el comportamiento de mampostería reforzada con barras de FRP para estructuras nuevas, ante cargas perpendiculares al plano. Para evaluar la capacidad de la mampostería ante estas solicitaciones, se realizó una aproximación con los requisitos de los códigos estadounidenses de diseño:

- TMS 402-16 para diseño y construcción de estructuras en mampostería, publicado por “*The Masonry’s Society*” y que anteriormente era designado como el ACI 530. Este código se utilizó para el cálculo de las propiedades mecánicas de la mampostería en concreto.
- ACI 440.1R-15 para diseño y construcción de concreto reforzado con barras de FRP. Este código se utilizó para el cálculo de la capacidad teórica a flexión de los muros reforzados con FRP.

Basado en estas normativas, se generó un protocolo de diseño preliminar, para predecir la capacidad de carga de la mampostería reforzada con FRP y validarlo con resultados experimentales; para lo cual se ensayaron con diferentes cuantías de refuerzo, 7 muros de mampostería en concreto reforzados con CFRP – “*Carbon Fiber Reinforced Polymer*” por sus siglas en inglés –, 7 muros reforzados con GFRP – “*Glass Fiber Reinforced Polymer*” por sus siglas en inglés – y 2 muros reforzados con barras de acero convencionales, para un total de 16 muros. La longitud de los muros varió desde 1.0 m hasta 1.8 m, con cuantías del 0.13% al 0.45%. Se usó un diámetro de 12.7 milímetros para las barras de GFRP y CFRP, la denominación de las barras de acero fue la barra #4.

Se compararon los resultados de cargas últimas y deflexiones hallados con las ecuaciones de los códigos ACI 440.1R-15 y TMS 402-16 con los obtenidos experimentalmente. Para esto se tuvieron en cuenta las cargas en las cuales se presentaron las fisuras, magnitud de las deflexiones y se identificaron los modos de fallas.

En el siguiente capítulo, el primero de este documento, se presenta el marco de referencia que se tuvo en cuenta para la investigación, donde se define: los componentes de la mampostería en concreto, el refuerzo de FRP y las consideraciones de análisis y diseño. En el Capítulo 2, se recopiló el estado del arte; se presentan algunos de los trabajos

desarrollados hasta el momento, relacionados principalmente con la caracterización de barras de refuerzo de FRP y de análisis de mampostería reforzada con barras de acero convencional y barras de FRP usadas como refuerzo externo. En el Capítulo 3, se expondrán los objetivos de la investigación. En el Capítulo 4, se define el programa experimental, donde se muestran los resultados de la caracterización de los materiales, la construcción de los muros, el diseño del montaje para los ensayos y la instrumentación de los muros. En el Capítulo 5, se consignan los cálculos de la capacidad resistente de los muros y se presenta el protocolo de carga para los ensayos. En el Capítulo 6, se exponen los resultados de los ensayos, posteriormente en el Capítulo 7, se analizan los resultados obtenidos y en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones y recomendaciones. Por último, en el Capítulo 9, se referencia la bibliografía utilizada para este trabajo.

Al final de documento, se incluyen los anexos donde se muestran los resultados de los ensayos para la caracterización de los materiales, la ficha técnica de las barras de FRP y los resultados de los ensayos de los muros de mampostería.

1. Marco de Referencia

El estado del arte consultado, evidencia que los FRP pueden ser utilizados para reforzar internamente elementos nuevos de concreto o para reforzar muros de mampostería externamente, pero no se encuentra bibliografía respecto a muros de mampostería nuevos en concreto, reforzados internamente con barras de FRP.

Sin embargo, a pesar de la ausencia de investigación y guías específicas para el diseño de este tipo de mampostería, el FRP se ha venido usando en la construcción de nuevas edificaciones. El procedimiento que se sigue en su diseño es presumiblemente una adaptación del 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. El TMS 402-16 brinda los requisitos para el diseño y construcción de mampostería nueva reforzada con barras de acero y es equivalente al ACI 318 para edificaciones de concreto.

A continuación, se presentará una descripción de las ventajas y limitaciones de la mampostería en concreto.

1.1. Mampostería en Concreto

La mampostería en concreto son unidades de concreto que unidas entre sí por medio de mortero de pega, conforman muros para la construcción de casas, edificios, tanques, entre otros. Estos muros se refuerzan colocando barras en sus perforaciones verticales las cuales a su vez son rellenadas con “*grout*”. Es uno de los sistemas constructivos más usado para las edificaciones en Colombia y en el mundo, por su capacidad portante, por su versatilidad para los diseños arquitectónicos, por su facilidad constructiva, sus acabados y economía.

Teniendo en cuenta los requisitos de diseño estipulados en el Título D de la NSR 10, la mampostería reforzada presenta buen comportamiento ante las diferentes sollicitaciones a

que se ve expuesta, adicionalmente ofrece diversas ventajas como las que se mencionan a continuación (Herrera y Madrid, 2003):

- Dado el pequeño tamaño de las piezas en comparación con el tamaño de los muros que van a conformar, el desperdicio de material es mínimo por la facilidad para modular los elementos.
- Se pueden lograr buenos acabados arquitectónicos ya sea dejando las piezas al natural o colocando pañetes para pintarlas.
- Los elementos de fachada al ser portantes, cumplen doble función: arquitectónica y estructural.
- Dentro de las celdas verticales de los bloques se pueden colocar instalaciones eléctricas, hidrosanitarias o de telecomunicaciones.
- Dado que el refuerzo se coloca dentro de las celdas de los bloques se elimina la utilización de formaletas.
- Permite la colocación de entresijos prefabricados lo que ayuda a disminuir los tiempos de construcción.
- Se pueden utilizar en cualquier zona de amenaza sísmica garantizando un buen desempeño.
- Pueden ser utilizados desde viviendas de interés social hasta edificios de altos estratos, pasando por edificaciones de uso industrial, comercial, hotelero, educativo, entre otros. Siempre tendrán grandes beneficios económicos.
- Se pueden lograr aislamientos acústicos y térmicos debido a que el volumen de aire dentro de las piezas es cercano al 50% del volumen total de las piezas, estos vacíos se pueden llenar con materiales especiales para el fin requerido.

No obstante, a las ventajas antes mencionadas se tienen algunas limitaciones, entre ellas las siguientes:

- Requieren controles de calidad rigurosos y específicos, que para edificios con sistemas estructurales aporticados no son necesarios.
- Requiere de un diseño arquitectónico con una rigurosa modulación de los muros y con una total interacción con el diseño estructural.
- Puede tener un peso ligeramente mayor que las estructuras aporticadas con divisiones livianas.
- Dado que el sistema estructural es de muros portantes las modificaciones arquitectónicas son limitadas cuando se trata de retirar algún elemento.

Los elementos que componen la mampostería en concreto reforzada, son los siguientes:

1.1.1. Bloque de mampostería

El bloque de mampostería con perforación vertical es un elemento de concreto prefabricado, con forma de prisma rectangular y con una o más perforaciones, es el responsable del comportamiento estructural y de los acabados arquitectónicos. Con los bloques se pueden construir muros de mampostería con refuerzo en sentido horizontal y vertical.

En la fabricación de estas piezas se debe tener en cuenta la selección de los agregados, del cemento y los aditivos, porque de estos dependerán las características mecánicas de las piezas y su acabado final.

Las características de las unidades de mampostería en concreto están normalizadas por la NTC 4026 para mampostería estructural y se resumen en las siguientes tablas:

Densidad (kgf/m ³)		
Peso Liviano	Peso Mediano	Peso Normal
Menos de 1680	De 1680 hasta menos de 2000	2000 o más

Resistencia a la Compresión a los 28 Días Evaluada Sobre el Área Neta Promedio, Valor Mínimo (MPa)		
Mampostería Estructural		
Alta	13	11
Baja	8	7

Absorción de Agua Según el Peso del Concreto Secado en Horno (kgf/m ³)			
Promedio de 5 Unidades, Máximo %			
Mampostería Estructural			
Clase	Peso		
	Liviano Menos de 1680	Mediano de 1680 hasta menos de 2000	Normal 2000 o más
Alta	15	12	9
Baja	18	15	12

Contenido de Humedad			
Promedio de Tres Unidades, Máximo, Como % del Valor Total de la Absorción de Agua			
Contracción Lineal por Secado	Condiciones de Humedad de la Obra o del Sitio de Uso de las Unidades		
	%	Humedad	Intermedia
De menos de 0.03	45	40	35
De 0.03 hasta menos de 0.045	40	35	30
De 0.045 hasta 0.065 (Máximo)	35	30	25

1.1.2. Mortero de pega

El mortero de pega gracias a sus cualidades de adherencia, une las piezas de mampostería por medio de sus juntas horizontales y verticales. Debe tener una buena plasticidad y manejabilidad, así como una buena retención de agua para que las piezas de mampostería no absorban la humedad y pueda desarrollar satisfactoriamente su resistencia. Está constituido por cemento, cal, arena, agua y aditivos.

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 – según la NSR 10 y deben cumplir la NTC 3329.

Por medio de cubos de 50 mm de lado o cilindros de 75 mm de diámetro por 150 mm de altura se mide la resistencia a la compresión de los morteros a los 28 días de fundidos, según las indicaciones de la NTC 3546. En la NTC 111 y 4050 se indican los ensayos de flujo y retención de agua.

1.1.3. Mortero de inyección – “Grout” –

Es una mezcla fluida de agregados y cemento, que debe llenar por completo las celdas de la mampostería, uniendo las piezas a las barras de refuerzo para que trabajen como una sola unidad. El mortero de relleno debe cumplir la NTC 4048.

Está compuesto por cemento Portland Tipo I, II o III, que debe cumplir con las NTC 121 y NTC 321, cal tipo S que debe cumplir con la NTC 4019, agregados que deben cumplir con la NTC 4020 y aditivos que deben cumplir con la NTC 1299.

Deben tener entre sus características fluidez, adherencia y resistencia a la compresión.

1.1.4. Acero de refuerzo

La cantidad y tipo de refuerzo que lleva la mampostería, debe ser el indicado por el ingeniero estructural. El refuerzo vertical deberá ir embebido entre el mortero de relleno y trabajará monolíticamente con la mampostería. Las barras de acero de refuerzo deben cumplir con los requisitos especificados en la NTC 2289.

El refuerzo vertical se debe colocar en posición antes del llenado de las celdas con el mortero de relleno.

1.2. Refuerzo de FRP

Las barras de refuerzo de FRP, están hechas de polímeros reforzados con fibras que pueden ser de vidrio, carbono o aramida. Las fibras tienen la función de dar el refuerzo

mecánico y la resina tiene la función de mantener unido el conjunto, además de dar las propiedades físicas finales al elemento, protegerlas de daño ambiental y mecánico. En algunas ocasiones se les añaden aditivos para darles propiedades específicas.

Con respecto a sus propiedades físicas, las barras de FRP son aproximadamente 5 veces más livianas que el acero de refuerzo por su menor densidad – 12.5 kN/m^3 a 21.0 kN/m^3 – lo que conlleva a menores cargas de transporte, menores costos por mano de obra y tiempos reducidos durante la instalación comparadas con el acero. Su coeficiente de expansión térmica en sentido longitudinal depende de la fibra, mientras que transversalmente depende de la resina; este coeficiente, se considera bajo en comparación con el acero de refuerzo.

La resistencia de las barras depende del material con el cual fue reforzada la resina y presentan por lo general un comportamiento elástico lineal hasta la falla, razón por la cual su uso aún no ha sido aceptado para efectos sismoresistentes. Las barras de FRP tienen una baja ductilidad y fluencia, adicionalmente no presentan fatiga. No se recomienda la utilización de estas barras para resistir fuerzas a compresión ya que podrían presentar fallas por pandeo o corte, las barras de CFRP presentan mejor comportamiento ante fuerzas de tensión y compresión que las barras de GFRP; por otro lado, las barras de AFRP – “*Aramid Fiber Reinforced Polymer*” por sus siglas en inglés – presentan un comportamiento inferior que los otros dos tipos de barras. Las barras de FRP presentan un comportamiento deficiente al corte ya que su refuerzo principal no está en dirección transversal. De otro lado, la adherencia tiene un rol muy importante en el diseño y construcción de elementos reforzados con barras de FRP, la adherencia depende principalmente de la interfaz entre la barra y el material cementante que se esté usando; esta, se presenta por fricción, que en algunas ocasiones es dada por las estrías hechas en las barras de FRP durante su fabricación lo cual produce una traba mecánica o por arena que es impregnada en las barras para mejorar condiciones de adherencia. Cuando las barras de FRP están sometidas a periodos largos y constantes de cargas estas pueden fallar por “*creep*”. Gaytán. (2003).

El FRP, Inicialmente fue un material utilizado para 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.

Pueden ser empleados obteniendo mejores resultados que su rival directo el acero como afirma Gaytán (2003) en:

- Estructuras expuestas a salinidad.
- Plantas de procesos químicos.
- Plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Instalaciones petroquímicas.
- Plantas nucleares.
- Instalaciones con resonancia magnética.
- Estructuras en general que estén expuestas a agentes corrosivos.

Adicionalmente tienen muchas ventajas en la construcción como:

- Menor peso
- Alta relación entre su esfuerzo resistente y peso.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Baja conducción térmica.
- No son magnéticas.
- Son transparentes a las ondas de radar.
- Son aislantes.
- Requieren poco mantenimiento.
- Gran durabilidad.
- Alta resistencia al impacto.

A pesar de que ya existen diferentes empresas productoras de estos materiales y se comercializan a nivel internacional, aún no han podido ser usadas en la construcción masivamente, principalmente porque se cree que elevan significativamente los costos de las obras. Es pertinente tener en cuenta que no se sabe a ciencia cierta la vida útil de una estructura construida con estos “nuevos” materiales, pero sí, que es ampliamente superior a la vida útil de las estructuras construidas con materiales convencionales y que por lo tanto al largo plazo podrían ser estructuras más económicas o equivalentes.

1.3. Consideraciones de Análisis y Diseño

Dada la ausencia de un código de análisis y diseño para mampostería de concreto reforzada con FRP, para el cálculo analítico de: la cuantía balanceada, el modo de falla esperado, la deformación unitaria en las barras, el momento resistente nominal, la carga de falla, el momento de agrietamiento y las deflexiones máximas en el muro; es posible hacer una aproximación de estas propiedades, siguiendo las recomendaciones estipuladas en el ACI 440.1R-15 donde se consideran las propiedades del FRP y las ecuaciones propuestas en el TMS 402-16 para el cálculo de las propiedades de la mampostería.

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 perpendiculares, tomando lo necesario de cada uno de estos documentos, se puede calcular analíticamente las propiedades de muros sometidos a cargas perpendiculares al plano, igualmente es necesario conocer las propiedades de la mampostería, de las barras de FRP y las propiedades geométricas del muro de mampostería. Por lo tanto, es posible calcular la capacidad de la mampostería reforzada con FRP, mediante las siguientes ecuaciones, tomadas del ACI 440.1R-15:

- a. Cuantía balanceada y modo de falla.

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

Ecuación 1

$$\rho = \frac{A_f}{(b)(d)}$$

Ecuación 2

Para predecir el modo de falla se procede a revisar si la cuantía es mayor que la cuantía balanceada para determinar si la falla es por aplastamiento en la mampostería o por fluencia en las barras de refuerzo.

b. Profundidad del eje neutro

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

Ecuación 3

Donde:

$$A = (\alpha_1)(f'_m)(b)(\beta_1)$$

Ecuación 4

$$B = (A_f)(E_f)(\varepsilon_{mu})$$

Ecuación 5

$$C = (A_f)(E_f)(\varepsilon_{mu})(d)$$

Ecuación 6

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 refuerzo junto con su cuantía.

c. Deformación unitaria en la barra

$$\varepsilon_f = \frac{(d - c)(\varepsilon_{mu})}{c}$$

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

d. Momento resistente nominal.

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

Ecuación 7

El valor resultante teórico calculado mediante esta ecuación se compara con el momento resultante de los ensayos de laboratorio.

e. Carga de falla.

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

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

Ecuación 8

f. Momento de agrietamiento

$$M_{cr} = (f_r)(S)$$

Ecuación 9

Donde:

$$S = \frac{I_g}{d}$$

Ecuación 10

Para el cálculo del momento de agrietamiento, se tienen en cuenta las propiedades geométricas del muro y el módulo de rotura f_r , que de acuerdo con lo estipulado por el TMS 402-16, depende si las celdas del muro están rellenas de “grout”. Sí el muro no tiene celdas rellenas, el valor del módulo de rotura es de 0,33 MPa y para un muro con todas las celdas llenas el valor del módulo de rotura es 1,09 MPa; por

interpolación lineal se determina el valor del módulo de rotura para muros con sus celdas parcialmente llenas.

g. Deflexiones máximas en el muro.

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

Ecuación 11

Para el cálculo de las deflexiones, se considera la inercia y el momento del muro; agrietado y en condición normal, también su longitud y módulo de elasticidad.

Donde:

$$I_g = \frac{(b)(t^3)}{12}$$

Ecuación 12

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

Ecuación 13

$$n = \frac{E_f}{E_m}$$

Ecuación 14

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.

El planteamiento de estas ecuaciones, se basa en el método de estado límite de resistencia. La resistencia requerida para los elementos de mampostería estructural se obtiene como el

valor máximo, expresado en términos de carga o momento. La resistencia de diseño que tiene el elemento, debe ser igual a su resistencia 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:

- 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 0.0025.

En el diseño de los muros de mampostería reforzada con acero, se prevé que el conjunto falle 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 la mampostería reforzada con barras de FRP, en el diseño se prevé que la falla sea por aplastamiento en las piezas de mampostería; no se lleva a la falla las barras de FRP por tener un comportamiento frágil; 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.

A continuación, en el capítulo del estado del arte, se presentan algunas investigaciones referentes al FRP y la mampostería reforzada.

2. Estado del Arte

Después de buscar sin éxito investigaciones que involucrarán el estudio del comportamiento de mampostería de concreto reforzada internamente con barras de FRP y en aras de enriquecer la presente tesis, a continuación, se presentan algunos de los trabajos desarrollados hasta el momento, relacionados principalmente con la caracterización de barras de refuerzo de FRP y de análisis de mampostería reforzada con barras de acero convencional y barras de FRP usadas como refuerzo externo.

2.1. Anclaje de Barras de Refuerzo de GFRP para Ensayos a Tracción.

Dado que para la caracterización de las barras de FRP, no se sigue el mismo procedimiento estandarizado que para las barras de acero convencionales, debido a que los extremos de las barras deben tener un anclaje especial para poder ser tensionados por la máquina, la empresa Hughes Brothers, Inc, de Seward, Nebraska, en julio de 2002, realizó ensayos a tracción a barras de GFRP, teniendo en cuenta procesos de calidad tanto para los ensayos como para los sistemas de anclajes de los mismos y generó un procedimiento para la realización de estos ensayos.

Tomaron un mínimo de 6 muestras al azar de cada diámetro para los ensayos de tracción. Cada una de las muestras fue cortada con una longitud de 122 cm y se ensamblaron a los anclajes.

Para los ensayos a tensión de las barras, establecieron el siguiente procedimiento:

1. Colocar una tapa de PVC en el extremo de un tubo "Schedule 40".
2. Mezclar el mortero expansivo que se va a utilizar.
3. Verter el mortero dentro del tubo.
4. Insertar la barra que se va a ensayar dentro del tubo y mezclar con un ligero movimiento de giro hasta que la barra quede completamente asentada en el extremo del tubo. La barra debe sobresalir aproximadamente 3 mm más allá de la tapa.

5. Golpear ligeramente el exterior del tubo para eliminar el aire atrapado
6. Apretar una abrazadera alrededor de la tapa del tubo.
7. Esperar a que la lechada fragüe durante aproximadamente 6 horas antes de ensamblar el otro extremo.

Las muestras terminadas se deben dejar fraguar aproximadamente 72 horas a una temperatura ambiente y se deben meter al horno posteriormente a una temperatura de 57°C durante 2 horas antes de los ensayos.

A continuación, en las Fotos 3 y Foto 4, se muestran los montajes de las barras antes de ser ensayadas. Este procedimiento de ensayo, fue calificado como efectivo para lograr fallar las barras de FRP y establecer sus propiedades



Foto 3 Montaje de las Barras Antes del Ensayo



Foto 4 Detalle del Anclaje en el Extremo de las Barras

2.2. Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de las Barras de FRP. Micelli y Nanni.

Esta investigación fue desarrollada por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Missouri y el Departamento de Innovación de Ingeniería de la Universidad de Lecce, en marzo de 2001.

En este estudio se describe un método efectivo para caracterizar las propiedades mecánicas de barras de FRP sometidas a tensión. Para validar el procedimiento, varias muestras de FRP de distintos tamaños y diferentes características de rugosidad fueron ensayadas. A continuación, en la Foto 5 se presentan los tipos de

barras caracterizadas, donde se puede ver barras en sus secciones transversales, circulares y rectangulares, y en sus texturas corrugadas y lisas.



Foto 5 Detalle Muestras de FRP

Se ensayaron barras con resinas epóxicas y de poliéster, reforzadas con carbono y vidrio. Entre las pruebas que se les hicieron se incluyó la exposición a sustancias alcalinas y a agentes medio ambientales como congelamiento, altas humedades relativas, altas temperaturas y exposición a rayos ultravioleta; todo esto por medio de una cámara ambiental que aceleraba los procesos. Se usó un microscopio electrónico de barrido – ME – para observar mediante imágenes cualitativas el comportamiento de las fibras y resina cuando eran sometidas a ataques químicos.

Se midieron cuidadosamente las propiedades mecánicas longitudinales y transversales, se encontraron correlaciones entre los resultados de caracterización de los materiales y los estudios de durabilidad en exposiciones aceleradas a agentes ambientales agresivos.

Entre los resultados encontrados, se observó que los agentes ambientales combinados no afectaron la durabilidad de las barras CFRP y GFRP, de hecho, no se encontró aumento de peso después de los ciclos combinados de alta humedad, las propiedades mecánicas residuales de las fibras y resinas no fueron afectadas por los factores ambientales acelerados. Con los resultados de este estudio, se disminuyó la incertidumbre relacionada con la seguridad a largo plazo, comparado a un posible ataque ambiental constituido por ciclos de baja temperatura y alta temperatura combinados con períodos de exposición a la humedad.

La información derivada de estas pruebas puede considerarse conservadora, ya que las barras fueron expuestas directamente a los agentes en una cámara ambiental, simulando un comportamiento a largo plazo. En términos de comportamiento de absorción, se registró una alta difusión de solución en la resina de poliéster, mientras que el polímero epóxico se afectó sólo en las capas externas. Esto pudo deducirse claramente de las pruebas gravimétricas y las observaciones con el ME.

Las barras de fibra de carbono no mostraron cambios en las propiedades mecánicas de tracción. Sin embargo, como se muestra en la Foto 6, las imágenes del ME pudieron detectar desde un punto de vista microscópico daños y su ubicación en la estructura de este material compuesto. La prueba mecánica tradujo los efectos de los agentes ambientales en una disminución de la resistencia y la rigidez.

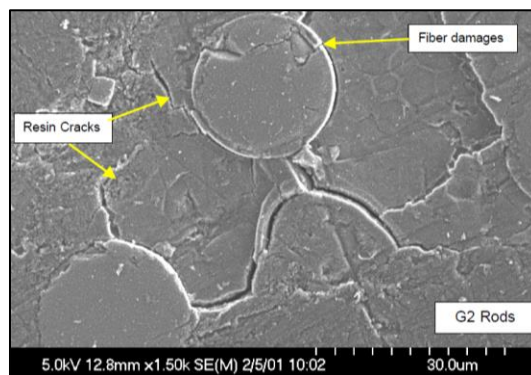


Foto 6 Detalle de Daños en Barra de FRP Visto con el ME

Aunque la resistencia máxima no varió, las mediciones de peso y las imágenes del ME destacaron daños en los sistemas epóxicos. Los resultados de las pruebas evidenciaron que el contenido y las propiedades de las fibras controlan la resistencia y la resina utilizada afecta la durabilidad de la barra.

La matriz de poliéster ensayada mostró un rendimiento deficiente, las barras elaboradas con este tipo de resina, recomiendan no utilizarlas como refuerzo estructural. Los sistemas epóxicos evaluados mostraron diferente desempeño lo cual se atribuye a la composición química de los productos que constituyen las resinas.

Durante los ensayos pudieron concluir que, la relación entre la longitud y el diámetro de las varillas no afectó los resultados de las pruebas de tracción. Recomiendan el análisis cualitativo mediante la técnica de ME, cuando sea necesario conocer los mecanismos de daño causados por agentes agresivos, ya que los efectos en la fibra y la matriz fueron evidentes después del envejecimiento acelerado.

Respecto al comportamiento a largo plazo de barras ensayadas, las resinas contribuyen a aumentar la durabilidad de las barras de FRP, especialmente para los especímenes GFRP, ya que la fibra de vidrio es más sensible a los agentes externos. Aunque las directrices de diseño se han elaborado en diferentes países, incluidos los EEUU, Japón, Canadá y Reino Unido, las recomendaciones y los coeficientes de diseño, que podrían tener en cuenta el comportamiento a largo plazo del refuerzo de FRP, no estaban bien definidos; por lo tanto, se llevaron a cabo varios estudios que proporcionaron disposiciones para la caracterización mecánica y de durabilidad de las barras de FRP.

Con referencia al ACI 440.1R-15, esta indica, que se puede utilizar un factor de degradación ambiental C_e para calcular la fuerza de diseño del FRP a partir de los resultados experimentales y se deben proporcionar recomendaciones sobre la degradación de la resina, los siguientes son los valores del coeficiente C_e establecidos para CFRP y GFRP:

- $C_e = 0,90$ se puede utilizar para refuerzo CFRP
- $C_e = 0,70$ se puede utilizar para refuerzo de GFRP

Producto de la investigación, se presentan las siguientes recomendaciones para ayudar a futuros investigadores e ingenieros a llevar a cabo estudios de caracterización y durabilidad sobre las barras de FRP:

- Para lograr fallar a tensión las barras de FRP, estas deben estar en sus extremos ancladas a unos elementos tubulares que puedan ser agarrados por la máquina universal sin sufrir daño para transmitir las fuerzas de tensión. Para lograr anclar las barras dentro del tubo, la lechada expansiva puede

substituir la resina epóxica para desarrollar una expansión que genere una fuerza de compresión y lograr fallar la barra a tensión.

- Establecer especificaciones de calidad que ayuden a elaborar directrices comunes de diseño.
- Se deben aplicar fuerzas comparables a las cargas de servicio durante la prueba de durabilidad para evaluar el efecto de la carga aplicada. Los efectos combinados de la penetración de fluidos – álcali, ácido, entre otros – y evaluar la exposición a otros agentes ambientales que podrían proporcionar más información sobre la durabilidad en ambientes agresivos.
- Las propiedades de la resina deben ser investigadas, ya que una degradación de la resina puede acelerar los daños de las fibras.
- Se necesitan investigaciones experimentales especialmente para torones de presforzado.

2.3. Resistencia a la Flexión y Ductilidad de Muros de Mampostería en Concreto Reforzados con Barras de Acero. Triwiyono, Nugroho, et al.

La siguiente investigación fue desarrollada por el Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la Universidad de Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia en 2015.

Debido al costo del material y al método de construcción simple, las estructuras de muros de mampostería de concreto se utilizan ampliamente en Indonesia. Los terremotos en algunas áreas de Indonesia han causado daños en varias edificaciones. Varios informes han identificado que la falla se produce por cargas fuera del plano, en especial en los muros no reforzados. Mejorar el rendimiento estructural de este tipo de mampostería, se ha vuelto importante. Por esta razón, se llevó a cabo un programa experimental para evaluar la resistencia a la flexión, ductilidad y modo de falla, de muros de mampostería en concreto, con y sin acero de refuerzo.

Las dimensiones de las piezas de mampostería en concreto que se usaron para la construcción de los muros fueron de 29 cm x 14 cm x 14 cm – largo, alto, espesor –

La configuración geométrica de los muros y su refuerzo, tuvo las siguientes dos variables:

- a. Las dimensiones de los muros fueron de 59 cm x 179 cm x 14 cm – largo, alto, espesor – con un refuerzo vertical de dos barras en cada uno de los extremos del muro con diámetros de 4.5 mm, 6.0 mm y 8.0 mm. Se construyeron tres muros para cada uno de los diámetros y dos muros sin refuerzo.
- b. Otros muros de dimensiones 179 cm x 59 cm x 14 cm – largo, alto, espesor – se construyeron usando refuerzo horizontal de dos barras en la parte superior e inferior del muro, con diámetros y tipos de muros iguales al ítem anterior.

Los ensayos se realizaron por medio de cargas lineales en el centro de la luz para producir flexión fuera del plano en los muros. La carga se aplicó mediante el uso de un gato hidráulico en el centro del tramo, para los muros con refuerzo vertical y horizontal, la carga se aplicó horizontalmente. Los muros estaban simplemente apoyados en sus extremos tal como se muestra en la Foto 7 y Foto 8, adicionalmente se muestra su configuración geométrica y el sistema de montaje usado para los ensayos.

La carga se incrementó gradualmente hasta la falla del muro. A partir de los datos de carga y deflexión se obtuvieron las gráficas correspondientes. A partir de la carga máxima se obtuvo el momento máximo, asumiendo el comportamiento como flexión pura.



Foto 7 Montaje para Ensayo Muro con Refuerzo Vertical



Foto 8 Montaje para Ensayo Muro con Refuerzo Horizontal

De los ensayos se obtuvieron los siguientes resultados:

La resistencia máxima a flexión de los muros con refuerzo vertical de diámetros 4.5 mm, 6.0 mm y 8.0 mm estuvieron en los rangos de 4.81 a 4.88 kN-m / m, 5.36 a 5.44 kN-m y 8.68 a 8.88 kN-m; respectivamente. Las resistencias teóricas a la flexión de los tres grupos calculadas a partir de las propiedades mecánicas de los materiales fueron 3.81 kN-m, 4.32 kN-m y 7.34 kN-m; respectivamente. La resistencia a flexión hallada experimentalmente fue poco más alta que la resistencia a la flexión teórica de los muros. Con respecto a los muros no reforzados de este grupo, las fuerzas máximas de los dos muros se consideraron diferentes; 35 kgf y 80 kgf. La flexión máxima fue de 0.23 kN-m y 0.54 kN-m. Estas resistencias fueron menores que las calculadas teóricamente; 1.63 kN-m.

Para los muros con el mismo diámetro de acero, cada grupo de especímenes se comportó de manera similar, especialmente sus curvas de Fuerza Vs. Deflexión. El

refuerzo no afectó la rigidez de la pared en el rango elástico. El aumento de la resistencia fue de 10 a 16 veces mayor que el de las paredes no reforzadas. Los especímenes de pared reforzada presentaron un comportamiento más dúctil que los no reforzados. La deflexión máxima fue de 4 a 6 veces mayor que las de los muros no reforzados.

Los momentos máximos de los muros con refuerzo horizontal de diámetros 4.5 mm, 6.0 mm y 8.0 mm estuvieron en los rangos de 3.32 a 4,27 kN-m, 4.2 a 6.11 kN-m y 4.2 a 9.36 kN-m; respectivamente. Los momentos teóricos de los tres grupos calculados a partir de las propiedades mecánicas fueron 3.81 kN-m, 4.32 kN-m y 7.34 kN-m; respectivamente. Los momentos resistentes calculados experimentalmente fueron aproximadamente los mismos que los calculados mediante las ecuaciones. Con respecto a los muros no reforzados de este grupo, los momentos máximos de los dos muros se consideraron diferentes; 1.7 a 2.37 kN-m. Esta resistencia fue un poco más alta que la resistencia a la flexión teórica; 1,63 kN-m.

Para los muros con el mismo diámetro de acero, cada grupo de especímenes se comportó de manera similar, especialmente sus curvas de Fuerza Vs. Deflexión. El refuerzo no afectó la rigidez de la pared en el rango elástico. El aumento de la resistencia fue de 2 a 6 veces mayor que los muros sin refuerzo. Los especímenes de pared reforzada presentaron un comportamiento más dúctil que los no reforzados, presentando deflexiones entre 6 a 20 veces mayores con respecto a los muros no reforzados.

En cuanto al modo de falla de los muros, el esfuerzo del refuerzo de acero no alcanzó el límite de fluencia, aunque visualmente las grietas eran lo suficientemente anchas y la deflexión era suficientemente grande. La mayor parte del muro falló en el área de compresión de la mampostería, clasificada generalmente como modo de falla frágil.

Aunque los muros fallaron en condiciones frágiles, los dos materiales, acero de refuerzo y mampostería en concreto, se comportaron monolíticamente. Esto es lo ideal, para que en el momento en que el muro falle por alguna fuerza actuante, las

piezas de mampostería no se desprendan y causen daños materiales o lesiones personales.

2.4. Reforzamiento con Barras de FRP de Mampostería no Estructural Sometida a Cargas Fuera del Plano. Galati, Tumialán y Nanni.

Esta investigación estuvo a cargo del Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Medio Ambiente de la Universidad de Missouri junto a Simpson Gumpertz & Heger Inc, en el año 2005.

A continuación, se presentan los resultados del programa experimental que evaluó el comportamiento a flexión de muros no reforzados, repotenciados con barras de FRP embebidas en la mampostería. Se ensayaron un total de 15 muros. Los especímenes fueron reforzados con diferentes cuantías con el fin de observar su comportamiento y modos de falla. Se estudió la influencia de la forma de la barra en su sección transversal – circular frente a rectangular –, tipo de FRP, dimensión de la ranura y tipo de material usado para embeber las barras – pasta epóxica o pasta a base de cemento –. Basado en evidencia experimental y en los datos encontrados en la literatura, el documento proporciona criterios que pueden ser utilizados como directrices de diseño para el reforzamiento de muros de mampostería. En la Foto 9 y Foto 10, se muestran las ranuras que se hicieron para embeber el refuerzo y el sistema de montaje para los ensayos.



Foto 9 Detalle de Muro Reforzado

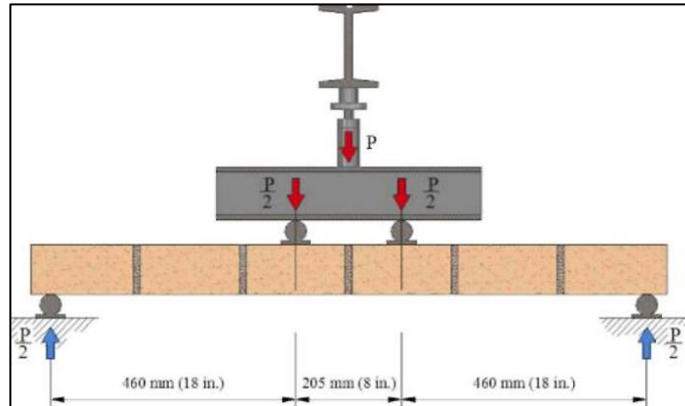


Foto 10 Montaje para Ensayo

Los muros presentaron tres modos de falla:

- Desprendimiento del refuerzo de FRP de la mampostería.
- Aplastamiento de la mampostería y rotura del FRP en tensión.
- Falla de corte de la mampostería en los apoyos extremos.

El desprendimiento del FRP fue el modo de falla predominante. Las grietas de flexión inicial se localizaron principalmente en las juntas de mortero donde se embebó el refuerzo. Dado que las tensiones en las juntas de mortero estaban siendo tomadas por el refuerzo de FRP, se produjo una redistribución de tensiones. Como consecuencia, las grietas se desarrollaron en las unidades de mampostería orientadas a 45° o en las juntas de mortero. Algunas de estas grietas seguían la longitud del mortero usado para el reforzamiento y la interface de mampostería que causaba el desprendimiento del FRP y posterior fallo del muro. Debido a la falta de rugosidad de las barras rectangulares se presentaron deslizamientos dentro del epóxico. Para los especímenes que tenían una ranura profunda, la separación se produjo por la división del material de empotramiento.

El fallo a flexión se presentó después de desarrollar grietas localizadas principalmente en las juntas de mortero, los muros fallaron por la ruptura del refuerzo de FRP o por el aplastamiento de la mampostería.

Adicionalmente se presentó una falla a cortante, que comenzó con el desarrollo de pequeñas fisuras verticales en la región de flexión máxima. Se observó una falla de corte a un ángulo de aproximadamente 45° . Las fuerzas de corte transmitidas sobre la grieta provocaron un desplazamiento diferencial en el plano, lo que dio lugar a una separación del FRP.

De las Curvas Momento Vs. Deflexión para los muros, se pudo observar que la resistencia y rigidez de los muros reforzados con FRP aumentaron dramáticamente al compararlos con los muros no reforzados.

Los momentos nominales de los muros no reforzados se calcularon considerando las recomendaciones del MSJC-02 – Masonry Standards Joint Committee. 2002 –. Pudo establecerse diferencias que oscilan entre 4 y 14 veces la capacidad teórica de flexión del muro de mampostería no reforzada. Dado que se tiene una variabilidad atribuida a los materiales, esta gama de valores debe tomarse simplemente como una referencia.

Para algunos de los ejemplares que utilizaban barras rectangulares de FRP de carbón o de vidrio, se observó una mayor ductilidad en comparación con los especímenes reforzados con barras circulares. De hecho, para estos especímenes la falla se debió al deslizamiento de las barras en el interior de la ranura. En estos casos, después de la falla, el muro todavía podía resistir más carga, debido a la fricción entre la barra rectangular y el material epóxico.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Predecir la capacidad teórica y evaluar experimentalmente el comportamiento a flexión de muros en mampostería de concreto, reforzados con barras de CFRP, GFRP y acero convencional, simplemente apoyados y sometidos a cargas perpendiculares al plano.

3.2. Objetivos Específicos

- Comparar los resultados de cargas últimas en los muros reforzados y deformaciones unitarias en el refuerzo, calculados teóricamente según las ecuaciones propuestas por el ACI 440.1R-15 y el TMS 402-16, con los resultados experimentales.
- Identificar los modos de falla teóricos dependientes de las cuantías de refuerzo y compararlos con los resultados de los ensayos de laboratorio.
- Comparar las deflexiones en el centro del muro ante cargas fuera del plano de los muros de mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP y de acero convencional.

4. Programa Experimental

Para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación, se planteó un programa experimental, para calcular las capacidades a flexión de la mampostería ante cargas perpendiculares al plano, se construyeron y ensayaron muros de mampostería en concreto, teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Longitudes desde 100 cm hasta 180 cm, con el fin de evaluar el comportamiento para diferentes cuantías de refuerzo
- Barras de refuerzo de GFRP, CFRP y acero, con el fin de comparar el comportamiento de los muros con tres distintos tipos de refuerzo
- El espesor de los muros fue de 14 cm y el alto de 220 cm, los cuales se mantuvieron constantes.

A continuación, en la Tabla 1 se presentan las denominaciones y características de cada uno de los muros estudiados, estos se enumeraron del 1 al 16, los 7 primeros fueron reforzados con GFRP, los 7 siguientes reforzados con CFRP y los 2 últimos se reforzaron con acero. Las cuantías de los muros 1 al 7 fue la misma que la de los muros 8 al 14. Para cuantificar el área de refuerzo de los muros reforzados en acero, se encontró una cuantía equivalente que brindara la misma capacidad a flexión del muro Tipo 1 que fue reforzado con GFRP.

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

Muro	Longitud (cm)	Refuerzo	Cantidad	Separación	Diámetro	As (cm ²)	Cuantía
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

Tabla 1 Resumen de los Muros del Programa Experimental

En la Figura 1, se puede observar la elevación de un muro típico en mampostería de concreto.

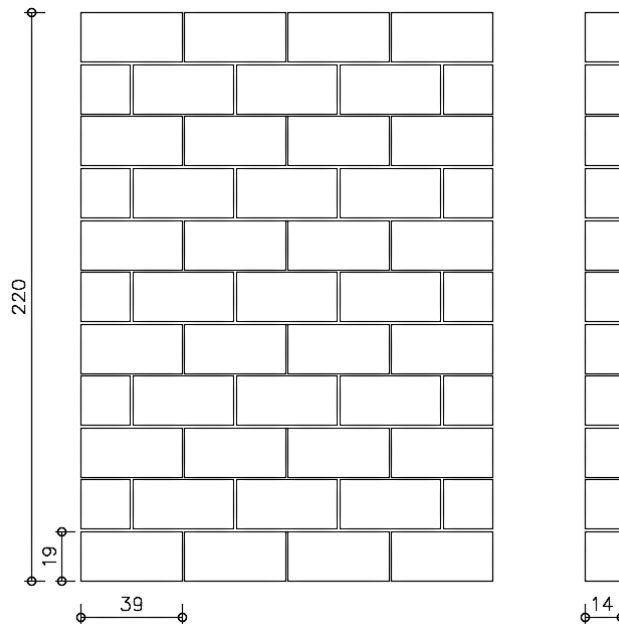


Figura 1 Configuración Geométrica Muros

A continuación, en la Figura 2, se presentan las vistas en planta de los diferentes muros ensayados, la selección de la longitud del muro y del número de barras de refuerzo a colocar, se estipuló con el fin de tener separaciones de refuerzo cada 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 120 cm y 140 cm; por otro lado para evaluar el esfuerzo existente en las barras durante los ensayos; los muros que por su configuración de refuerzo solo tenían una barra, esta fue instrumentada. Para los muros que tenían dos o más barras, se instrumentaron dos de ellas. El refuerzo tuvo la siguiente configuración e instrumentación vista en planta:

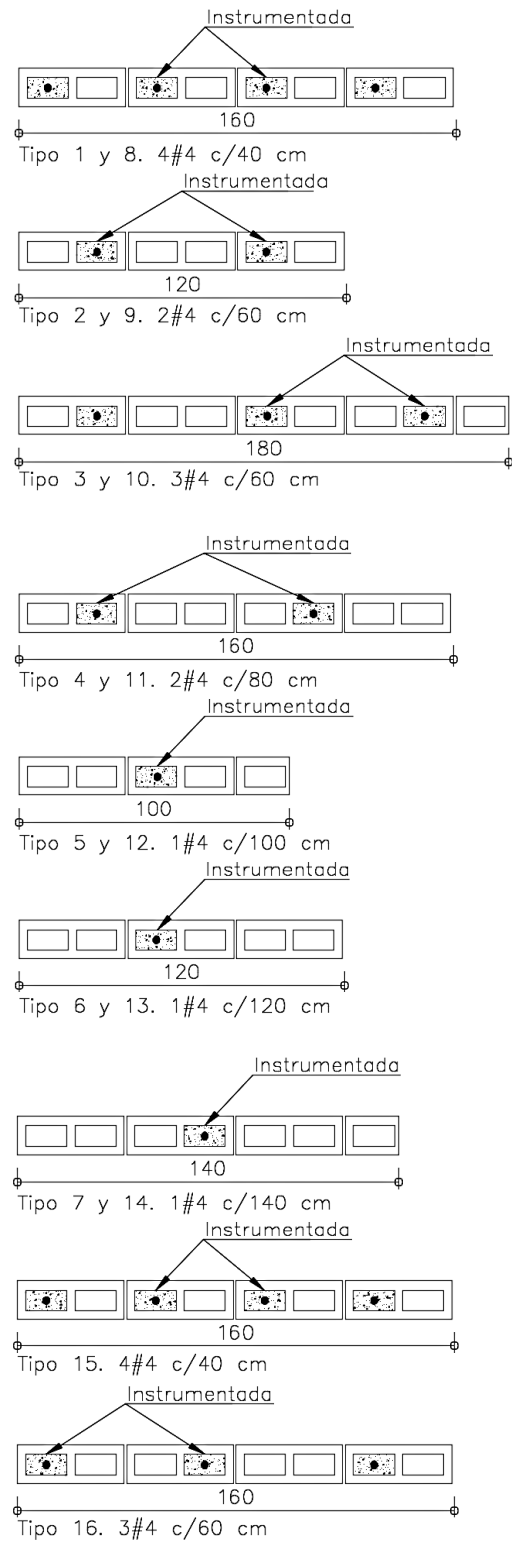


Figura 2 Configuración del Refuerzo de los Muros

Para la construcción de los muros se diseñó, tanto el mortero de pega como el mortero de relleno. Durante la construcción de los muros se tomaron muestras para su caracterización, igualmente se caracterizaron las barras de FRP, las unidades de mampostería y los muretes.

4.1. Caracterización de los Materiales

Las propiedades de los materiales usados en la presente investigación se encuentran consignadas en los anexos A. Mortero de Pega, B. Mortero de Relleno, C. Barras FRP, D. Mortero expansivo y E. Muretes de Mampostería en Concreto. A continuación, se describirá el procedimiento utilizado para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados.

4.1.1. Mortero de pega

De la mezcla utilizada para pegar las piezas de mampostería en concreto y siguiendo lo indicado en la norma ASTM 202.C109, se evaluó resistencia a la compresión f'_{cp} que en promedio fue de 23.0 MPa.

4.1.2. Mortero de relleno

De la mezcla utilizada para rellenar las piezas de mampostería en concreto y siguiendo lo indicado en la norma ASTM 202.C109, se evaluó la resistencia a la compresión f'_{cr} que en promedio fue de 29.6 MPa.

4.1.3. Mampostería en concreto

Se construyeron 6 muretes, tres de ellos con las celdas vacías y los otros tres con las celdas llenas y se fallaron para calcular la resistencia a la compresión, f'_m . Las dimensiones de los muretes fueron 60 cm x 40 cm – largo x alto –. Para calcular el f'_m se siguieron las recomendaciones del ACI-530.1-11, se tomó para el cálculo de

las capacidades de los muros el valor promedio del f'_m de los muretes ensayados; el cual fue de 10 MPa.

4.1.4. Barras FRP

El refuerzo de FRP, utilizado en la presente investigación fue suministrado por la Empresa Sireg, e importado desde Roma – Italia –; se hicieron los ensayos a tensión para las barras de FRP siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D7205. Se utilizó resina epóxica y mortero expansivo para anclar las barras a los elementos que prensó la máquina para el ensayo de caracterización; encontrándose un mejor comportamiento cuando las barras se anclaban en mortero expansivo, permitiendo fallar la barra en estudio. Al usar la resina epóxica, se presentó por lo general fallas por deslizamiento en los anclajes, dificultando el proceso de caracterización del material. A continuación, se presentan los valores representativos de las barras de FRP obtenidos en los ensayos, básicos para los cálculos correspondientes.

4.1.4.1 Barra GFRP

f_{fu}	=	916	MPa
E_f	=	58.7	GPa
ε_{fu}	=	0.0156	mm/mm

4.1.4.2 Barra CFRP

f_{fu}	=	2300	MPa
E_f	=	130	GPa
ε_{fu}	=	0.018	mm/mm

4.2. Construcción de los Muros

A continuación, se presentan la Foto 11 y Foto 12, mostrando el proceso constructivo de los muros de concreto, los cuales se apoyaron sobre una viga de concreto reforzado garantizando que no hubiese restricción al giro para el muro. La construcción de los muros y todos los ensayos necesarios del proyecto fueron realizados en los laboratorios de estructuras y materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.



Foto 11 Construcción Parcial de Muros



Foto 12 Construcción Final de Muros

Con el fin de registrar los esfuerzos a que se verían sometidas las barras de refuerzo de los muros, estas se instrumentaron antes de su instalación mediante galgas y se recubrieron para protegerlas durante la fundida del “grout” como se muestra en la Foto 13 y la Foto 14.



Foto 13 Instrumentación de Galgas en Barras



Foto 14 Protección Galgas en Barras

Las dovelas de cada uno de los muros se llenaron con “grout”, ver Foto 15, después de instaladas las barras, siguiendo las configuraciones de la Figura 2 para cada muro de estudio.



Llenado de celdas con mortero de relleno manualmente utilizando un balde

Foto 15 Inyección de las Celdas

4.3. Diseño del Montaje para los Ensayos

Con el fin de generar un circuito cerrado de reacción para someter los muros a flexión perpendicular al plano en su posición vertical, se usó el pórtico del actuador dinámico de la ECI para reaccionar contra este, un gato hidráulico de 100 kN, que empujó dos vigas, simulando las cargas en los tercios de los muros de ensayo, contra un marco de soporte de los muros, el cual consistió en una estructura ensamblada con perfiles metálicos que se sujetaban por medio de barras de 1"1/2 al pórtico del actuador dinámico, tal como se muestra en la Figura 3.

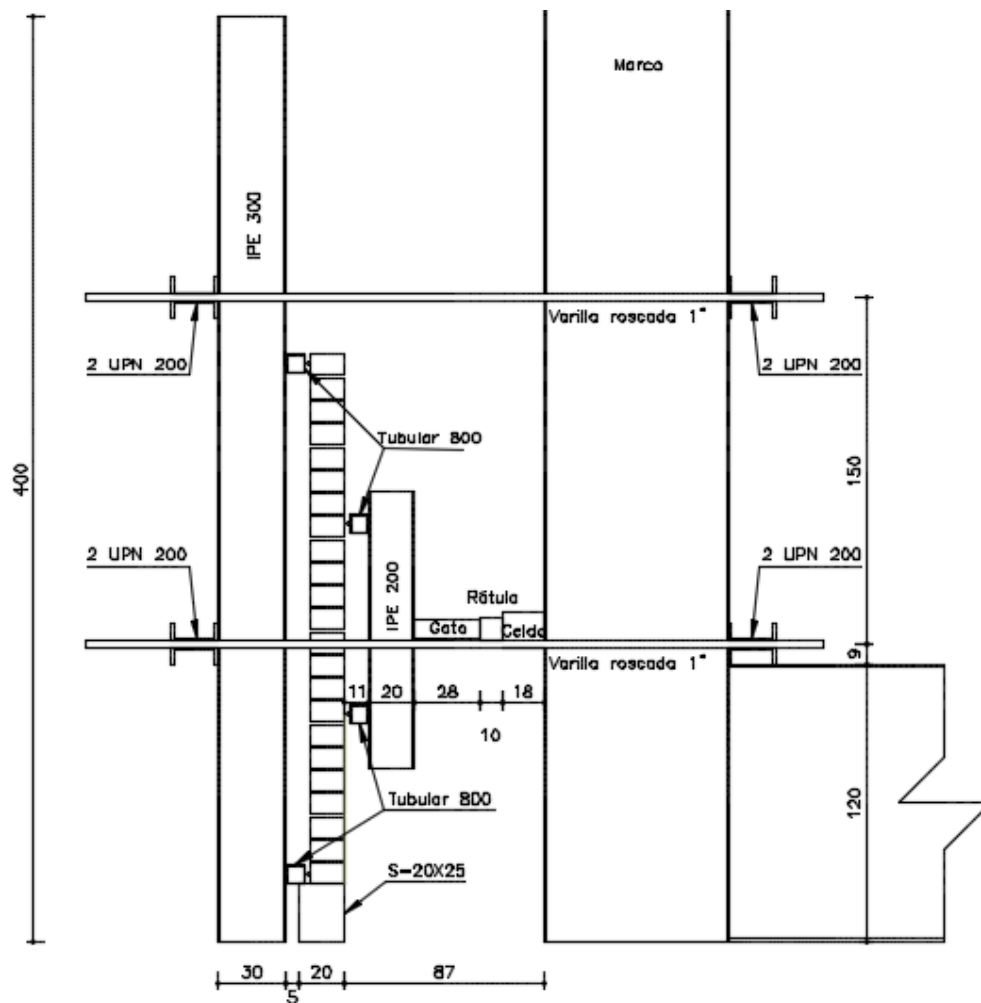


Figura 3 Esquema Montaje para Ensayos

En la Foto 16, se muestra el pórtico de reacción, el muro a ensayar, el gato y todos los elementos necesarios para los ensayos.



Foto 16 Vista General del Montaje

4.4. Instrumentación Externa

Los muros se instrumentaron externamente por su cara a compresión, mediante una galga en contacto directo con la 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; dicha instrumentación se presenta en los esquemas de la Figura 4 y en las Foto 17, Foto 18, Foto 19 y Foto 20.

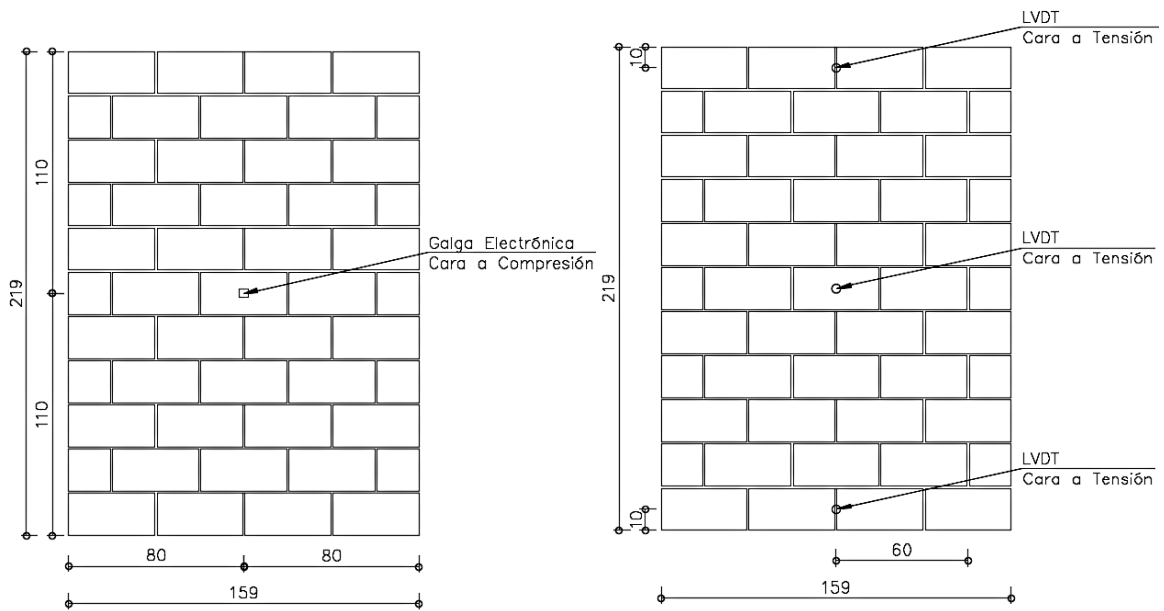


Figura 4 Instrumentación Externa de Muros



Foto 17 Ubicación LVDT Superior



Foto 18 Ubicación LVDT Intermedio



Foto 19 Ubicación LVDT Inferior

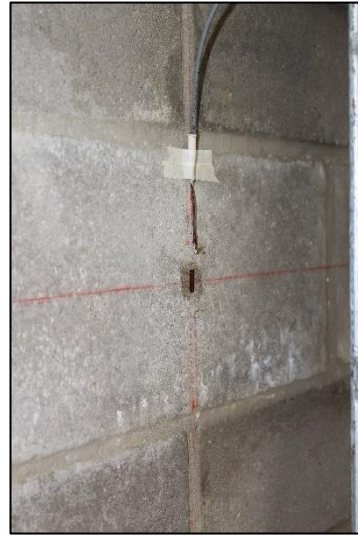


Foto 20 Ubicación Galga Electrónica en Muros

En la Foto 21 se muestra la plomada instalada en posición vertical en toda la altura del muro, que permitía visualizar la deflexión que tomaba el muro durante el proceso de ensayo y en la Foto 22 se observa el gato hidráulico y la celda de carga dispuestos para la correcta aplicación de la carga.



Foto 21 Plomada



Foto 22 Gato para Aplicar la Fuerza

A continuación, en el capítulo 5, se presenta el cálculo de las capacidades teóricas de los muros.

5. Cálculo de Capacidad Resistente de los Muros

Usando la metodología del ACI 440.1R-15, se calcularon los momentos y deflexiones esperadas para cada uno de los muros. Para el cálculo de las propiedades de la mampostería se usó el TMS 402-16.

Las propiedades de la mampostería que se tuvieron en cuenta para los análisis fueron las siguientes:

- $f'_m = 10$ MPa
- $E_m = 9000$ MPa
- $\epsilon_{mu} = 0.0025$ mm/mm
- $\alpha_1 = 0.8000$
- $\beta_1 = 0.8000$

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

- $F_{fu} = 916$ MPa
- $E_f = 58718$ MPa
- $\epsilon_{fu} = 0.0156$

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

- $F_{fu} = 2300$ MPa
- $E_f = 127778$ MPa
- $\epsilon_{fu} = 0.0180$

Para el cálculo de la capacidad teórica de cada uno de los muros, se calcularon los siguientes puntos:

- Cuantía balanceada y modo de falla.
- Deformación unitaria de la barra
- Momento resistente nominal.
- Carga de falla.
- Momento de agrietamiento
- Deflexiones máximas en el centro del muro.

Se siguió la metodología descrita en el Marco de Referencia. En el siguiente ejemplo se presenta el paso a paso del cálculo de la capacidad teórica del Muro 1:

Evaluación de la cuantía balanceada y modo de falla.

$$\rho b = (0.8) \left(\frac{10}{916} \right) (0.8) \left(\frac{0.0025}{0.0025 + 0.0156} \right) = 0.0010$$

$$\rho = \frac{507}{(1600)(70)} = 0.0045 > \rho b$$

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

Cálculo de la deformación unitaria en la barra

$$c = \frac{-74382 + \sqrt{74382^2 - (4)(10240)(-5206744)}}{(2)(10240)} = 19.2 \text{ mm}$$

Donde:

$$A = (0.8)(10)(1600)(0.8) = 10240 \frac{N}{mm}$$

$$B = (507)(58718)(0.0025) = 74382 \text{ N}$$

$$C = (507)(58718)(0.0025)(70) = 5206744 \text{ N} \cdot mm$$

$$\varepsilon_f = \frac{(70 - 19.2)(0.0025)}{19.2} = 0.66\%$$

Cálculo del Momento resistente nominal.

$$Mn = (0.8)(10)(1600)(0.8)(19.2) \left\{ 70 - \left[(0.8) \left(\frac{19.2}{2} \right) \right] \right\} = 12.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Cálculo de la carga de falla.

$$P = (6) \left(\frac{12.3}{2.03} \right) = 36.2 \text{ kN}$$

Cálculo del momento de agrietamiento

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

$$I_g = \frac{(1600)(140)^3}{12} = 365867 \text{ mm}^4$$

$$M_{cr} = \frac{365867}{70} (0.71) = 3.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Deflexiones máximas en el muro.

$$\delta = \left(\frac{(23)(3.7)(2030^2)}{(216)(9000)(365866667)} \right) + \left(\frac{(23)(12.3 - 3.7)(2030^2)}{(216)(9000)(12308162)} \right) = 34 \text{ mm}$$

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

Muro	Núm.	Af (mm ²)	b (mm)	d (mm)	FRP	p	pb	ef (%)	Mn (kN m)	P (kN)	fr (MPa)	Mcr (kN m)	δ (mm)
Tipo 1	4#4	507	1600	70	G	0.0045	0.0010	0.66	12.3	36.2	0.71	3.7	34
Tipo 2	2#4	253	1200	70	G	0.0030	0.0010	0.83	7.9	23.3	0.52	2.0	44
Tipo 3	3#4	380	1800	70	G	0.0030	0.0010	0.83	11.8	34.9	0.62	3.6	42
Tipo 4	2#4	253	1600	70	G	0.0023	0.0010	0.98	9.4	27.7	0.52	2.7	49
Tipo 5	1#4	127	1000	70	G	0.0018	0.0010	1.11	5.3	15.8	0.43	1.4	57
Tipo 6	1#4	127	1200	70	G	0.0015	0.0010	1.23	5.9	17.6	0.43	1.7	61
Tipo 7	1#4	127	1400	70	G	0.0013	0.0010	1.33	6.5	19.2	0.43	1.9	64
Tipo 8	4#4	507	1600	70	C	0.0045	0.0003	0.42	16.0	47.3	0.71	3.7	27
Tipo 9	2#4	253	1200	70	C	0.0030	0.0003	0.53	10.5	31.0	0.52	2.0	33
Tipo 10	3#4	380	1800	70	C	0.0030	0.0003	0.53	15.7	46.6	0.62	3.6	32
Tipo 11	2#4	253	1600	70	C	0.0023	0.0003	0.63	12.6	37.4	0.52	2.7	37
Tipo 12	1#4	127	1000	70	C	0.0018	0.0003	0.72	7.3	21.5	0.43	1.4	42
Tipo 13	1#4	127	1200	70	C	0.0015	0.0003	0.79	8.1	24.1	0.43	1.7	46
Tipo 14	1#4	127	1400	70	C	0.0013	0.0003	0.87	8.9	26.4	0.43	1.9	48

Tabla 2 Capacidades Teóricas de los Muros

Núm.: Cantidad y denominación de las barras de refuerzo

Debido a que ρ fue mayor que ρ_b , se esperaba falla por aplastamiento en para todos los muros ensayados.

5.1. Protocolo de Carga

Después de evaluadas las capacidades teóricas de los muros, se preparó el siguiente protocolo de carga en cuatro etapas para ensayar cada muro y llevarlo en la etapa final hasta la falla. La base del protocolo fue la carga máxima estimada.

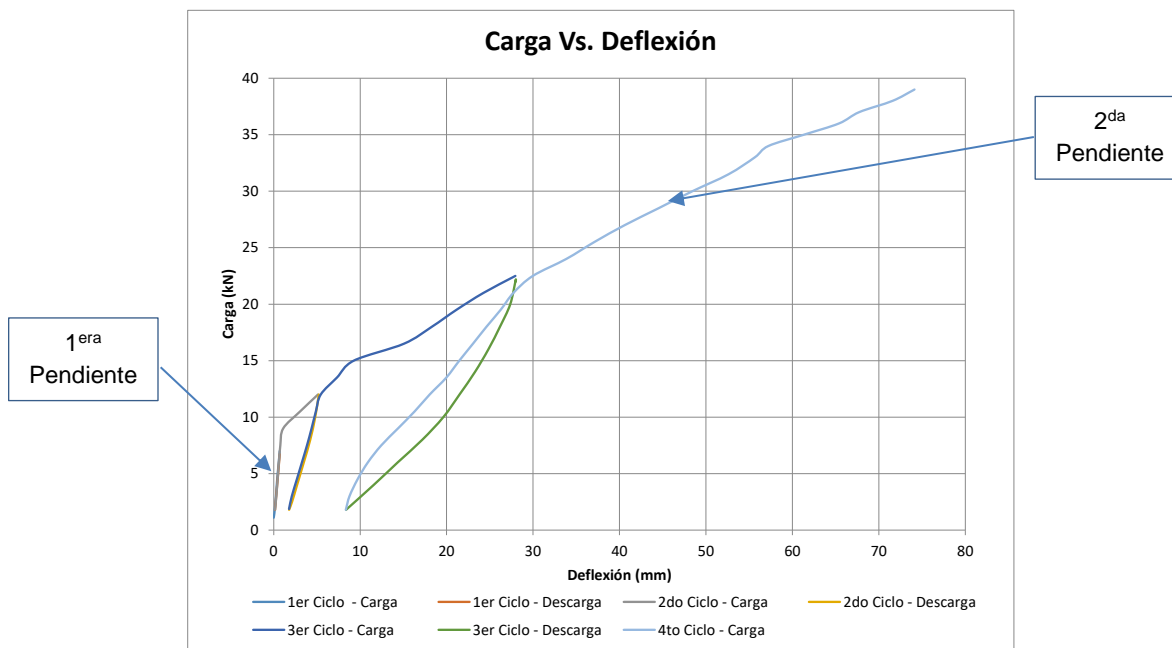
1. Cargar el muro al 20% de su resistencia admisible esperada.
2. Descargar el muro al 5% de su resistencia admisible esperada.
3. Cargar el muro al 40% de su resistencia admisible esperada.
4. Descargar el muro al 5% de su resistencia admisible esperada.
5. Cargar el muro al 80% de su resistencia admisible esperada.
6. Descargar el muro al 5% de su resistencia admisible esperada.
7. 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 siguiente capítulo.

6. Resultados de los Ensayos

Por medio de un equipo de adquisición de datos, se obtuvieron con las galgas, los datos de deformaciones unitarias tanto de las barras como de la mampostería 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.

A modo de ejemplo, en la Gráfica 1, se presenta la curva de Carga Vs. Deflexión en el centro de la altura, obtenidos para el muro Tipo 1; graficados para cada ciclo de carga y descarga. Como se puede observar después de la descarga de cada uno de los ciclos, el muro tendía a volver a su posición inicial, mostrando su comportamiento elástico. En esta misma gráfica, se evidencia que la curva tiene dos pendientes, la primera de ellas termina en el punto donde la mampostería se agrieta en la zona a compresión del muro y la segunda pendiente continua lineal hasta la falla. Las curvas de Carga Vs. Deflexión, incluyendo cada uno de los ciclos de carga y descarga, correspondiente a cada uno de los muros ensayados, se encuentran consignadas en el Anexo F.



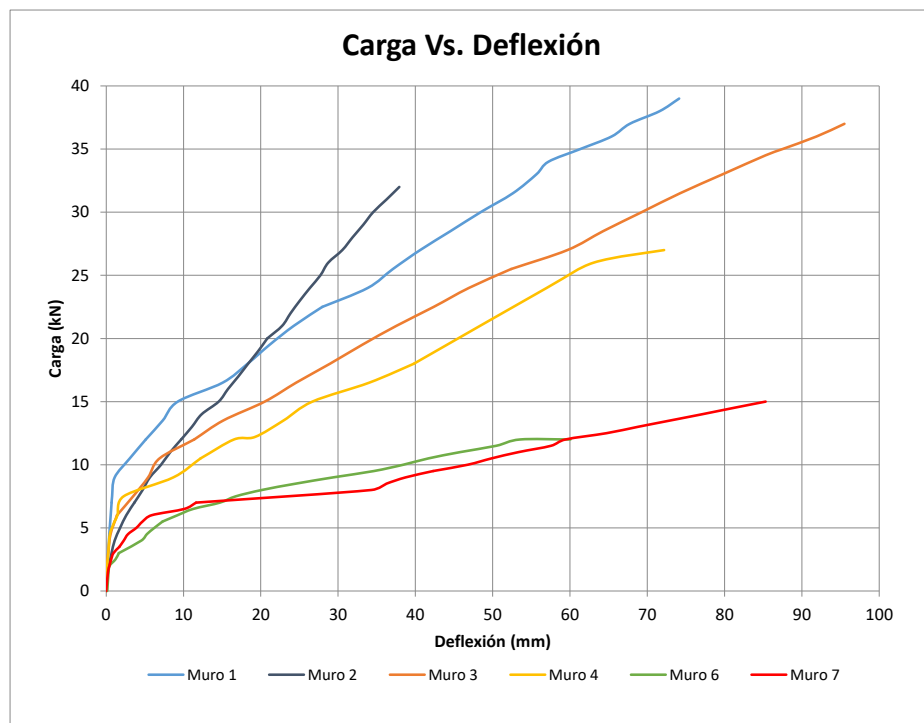
Gráfica 1 Carga Vs. Deflexión Típica en los Muros de Mampostería Reforzada con FRP

A continuación, se muestran las envolventes de las curvas de Carga Vs. Deflexión para cada uno de los muros, obtenidas de los ensayos de laboratorio.

En la Gráfica 2 se muestran las curvas de los muros reforzados con GFRP, donde se puede observar:

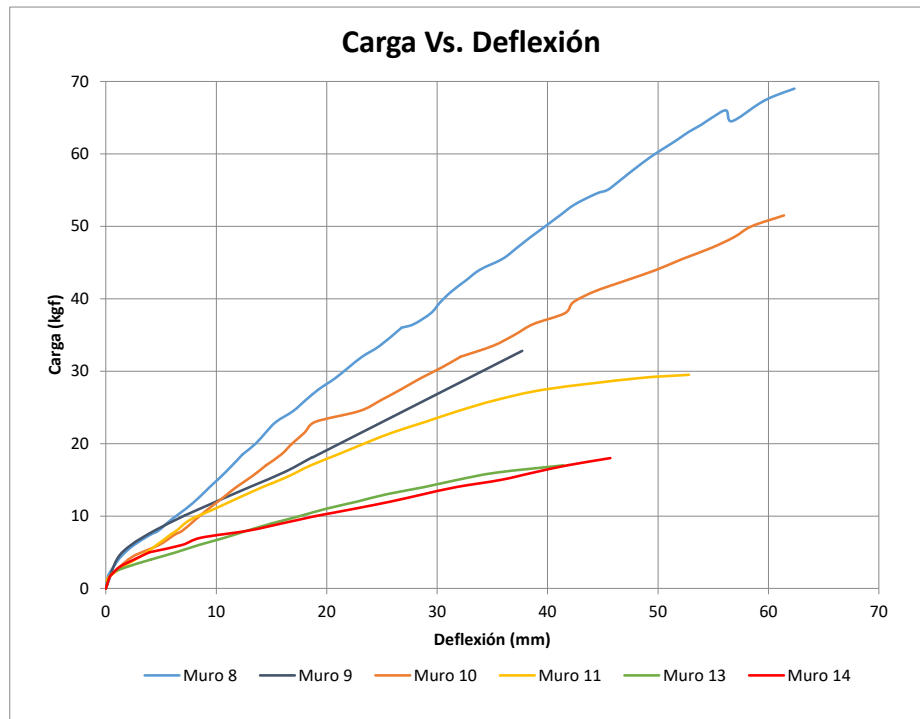
- Carga de falla
- Deflexión máxima
- Carga de agrietamiento

El comportamiento fue el esperado, las curvas presentan dos pendientes, 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.



Gráfica 2 Carga Vs. Deflexión Muros GFRP

En la Gráfica 3 se muestran las curvas de los muros reforzados con CFRP y se puede observar el mismo comportamiento de las curvas de los muros reforzados con GFRP de la Gráfica 2, no obstante, se observa que las cargas para llegar a las fallas de los muros, son mayores en promedio un 30%; estos porcentajes no son lineales y dependen de la cuantía de refuerzo. Adicional a esto, se pudo observar que las cargas de agrietamiento para los muros reforzados con CRFP fueron menores que las cargas de agrietamiento de los muros reforzados con GFRP.



Gráfica 3 Carga Vs. Deflexión Muros CFRP

En la Tabla 3 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 – $M_{exp} = \left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{L}{3}\right)$ –, las deformaciones experimentales en las barras de refuerzo se obtuvieron de las lecturas de las galgas. Los resultados ideales son aquellos en los cuales los momentos máximos experimentales son mayores a los momentos máximos teóricos.

Muro	Longitud (cm)	Núm.	Tipo de Refuerzo	P _{falla} (kN)	M _{exp} (kN-m)	ε _{fexp} (%)
Tipo 1	160	4#4	G	39.0	13.2	0.89
Tipo 2	120	2#4	G	32.0	10.8	0.44
Tipo 3	180	3#4	G	37.0	12.5	1.05
Tipo 4	160	2#4	G	27.0	9.1	0.87
Tipo 6	120	1#4	G	12.0	4.1	0.45
Tipo 7	140	1#4	G	15.0	5.1	0.48
Tipo 8	160	4#4	C	69.0	23.3	0.48
Tipo 9	120	2#4	C	32.8	11.1	0.45
Tipo 10	180	3#4	C	51.5	17.4	0.70
Tipo 11	160	2#4	C	29.5	10.0	0.30
Tipo 13	120	1#4	C	17.0	5.8	0.51
Tipo 14	140	1#4	C	18.0	6.1	0.48
Tipo 15	160	4#4	A	55.0	18.6	0.39
Tipo 16	160	4#4	A	43.0	14.5	0.26

Tabla 3 Resultados de los Ensayos

G: GFRP
C: CFRP
A: Acero

El modo típico de falla para los muros reforzados con FRP, tal como se esperaba fue por aplastamiento en la mampostería y en el mortero de pega en la cara a compresión de los muros, tal como lo evidencia la Foto 23 y Foto 24.



Foto 23 Aplastamiento en la Mampostería



Foto 24 Aplastamiento en el Mortero de Pega

Las fisuras que se presentaron fueron horizontales en la cara a tensión de los muros como se ve en la Foto 25. En algunos muros se presentó falla en las barras de FRP por tensión posterior a la falla por aplastamiento en la mampostería, como se aprecia en la Foto 26.



Foto 25 Fisuras Horizontales en el Mortero de Pega



Foto 26 Rotura en Barras FRP

Las deflexiones que se presentaron en los muros de concreto reforzados con FRP, no fueron permanentes, después de ser cargados y descargados, regresaban a puntos muy cercanos de su posición inicial. La razón de esto, como ya se mencionó, es atribuida a que las barras de FRP no tienen una zona de plasticidad, su comportamiento es elástico hasta la falla.

Los muros Tipo 5 y 12, presentaron un comportamiento atípico durante los ensayos, debido seguramente a su corta longitud y por tener una sola barra de refuerzo; no fue posible obtener sus resultados.

Una vez halladas las capacidades teóricas y experimentales de cada uno de los muros en estudio, se procedió a su análisis tal como se muestra en el siguiente capítulo.

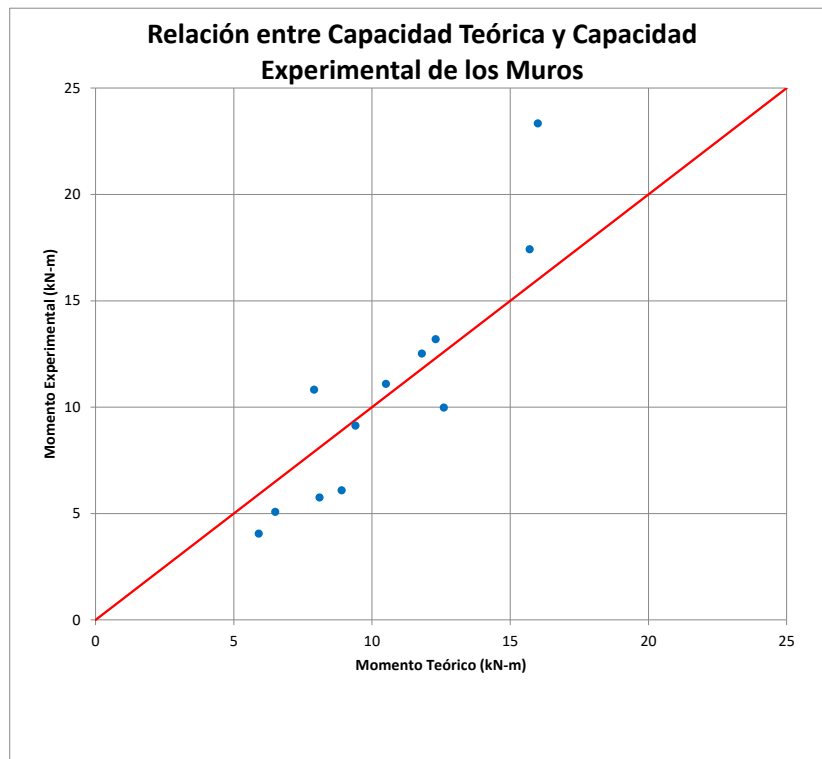
7. Análisis de los Resultados

En la Tabla 4, se comparan por medio de una relación los momentos máximos teóricos y los momentos máximos experimentales de los muros:

Muro	Longitud (cm)	Núm.	Tipo de Refuerzo	M_{exp} (kN-m)	$M_{teó}$ (kN-m)	$M_{teó}/M_{exp}$	P_{falla} (kN)
Tipo 1	160	4#4	G	13.2	12.3	0.93	39.0
Tipo 2	120	2#4	G	10.8	7.9	0.73	32.0
Tipo 3	180	3#4	G	12.5	11.8	0.94	37.0
Tipo 4	160	2#4	G	9.1	9.4	1.03	27.0
Tipo 6	120	1#4	G	4.1	5.9	1.45	12.0
Tipo 7	140	1#4	G	5.1	6.5	1.28	15.0
Tipo 8	160	4#4	C	23.3	16.0	0.69	69.0
Tipo 9	120	2#4	C	11.1	10.5	0.95	32.8
Tipo 10	180	3#4	C	17.4	15.7	0.90	51.5
Tipo 11	160	2#4	C	10.0	12.6	1.26	29.5
Tipo 13	120	1#4	C	5.8	8.1	1.41	17.0
Tipo 14	140	1#4	C	6.1	8.9	1.46	18.0

Tabla 4 Relación entre Capacidad Teórica y Capacidad Experimental de los Muros

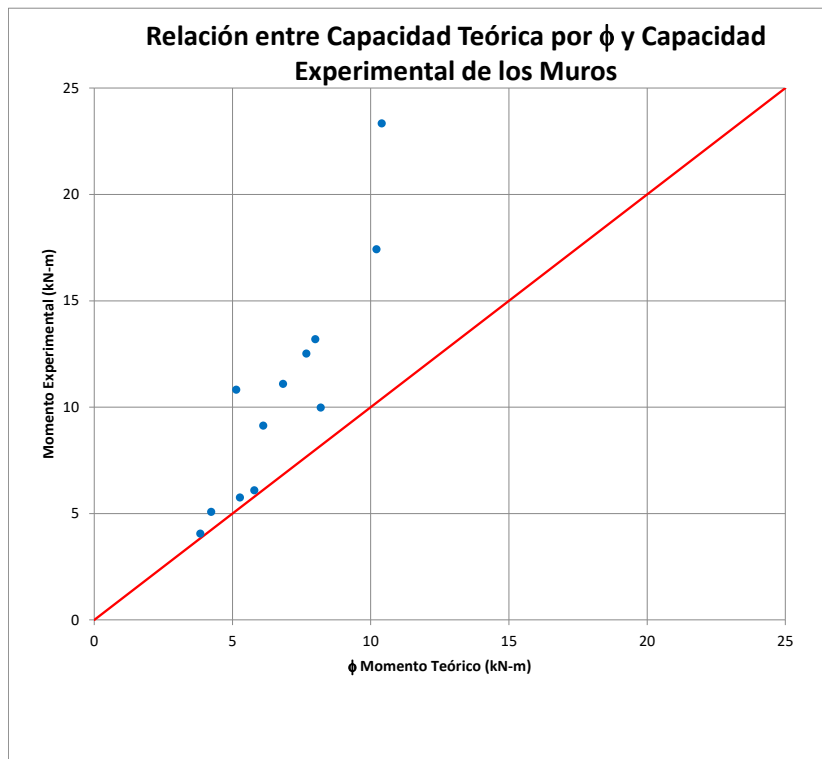
Respecto a la comparación de momentos máximos de la Tabla 4, el resultado esperado es aquel en el que el momento teórico es menor al momento experimental. Hubo seis muros en los cuales la relación entre momento, teórico y experimental fue mayor a 1.0; esos muros fueron los de menores cuantías de refuerzo y mayores separaciones entre barras. Estos resultados se hacen más evidentes gráficamente, tal como se presentan en la Gráfica 4 para cada uno de los muros en estudio; donde se ubican en las ordenadas los momentos experimentales y en las abscisas los momentos teóricos.



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

Los resultados que se encuentran por debajo de la línea roja, corresponden a los muros con menores cuantías de refuerzo tanto de GFRP como de CFRP. Para cumplir con las relaciones entre momento teórico y momento experimental, es evidente que debe existir un límite mínimo, de la cuantía de refuerzo y de separación de barras.

El modo de falla esperado en los resultados teóricos era el aplastamiento de la mampostería; este coincidió con el obtenido experimentalmente, por lo tanto, se aplicó el factor de reducción ϕ de 0.65 a la capacidad nominal a flexión, de acuerdo con lo estipulado en el ACI 440.1R-15. En la Gráfica 5, se muestran los resultados de los momentos máximos experimentales y los momentos máximos teóricos, afectando estos últimos por el factor ϕ .



Gráfica 5 Relación entre Capacidad Teórica por ϕ y Capacidad Experimental de los Muros

Una vez afectado el valor del momento máximo teórico por el factor ϕ calculado, todos los resultados se encuentran por encima de la línea roja, lo que significa que el momento máximo experimental es mayor que el momento máximo teórico. Sin embargo, es evidente que aún es necesario realizar más investigaciones que validen estos resultados y permitan determinar los límites mínimos de las cuantías y las separaciones máximas entre barras.

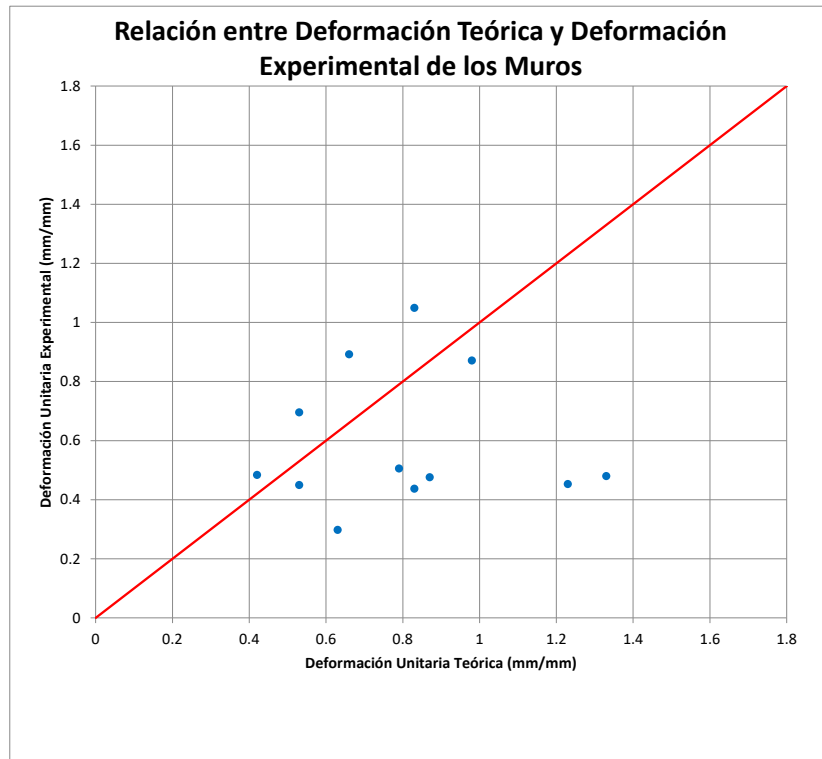
En la Tabla 5, se comparan por medio de una relación, las deformaciones unitarias teóricas y las deformaciones unitarias experimentales, registradas en las barras de refuerzo:

Muro	Longitud (cm)	Núm.	Tipo de Refuerzo	$\varepsilon_{f_{exp}}$ (%)	$\varepsilon_{f_{teó}}$ (%)	$\varepsilon_{f_{teó}}/\varepsilon_{f_{exp}}$	$\varepsilon_{f_{exp}}/\varepsilon_{f_u}$
Tipo 1	160	4#4	G	0.89	0.66	0.74	0.42
Tipo 2	120	2#4	G	0.44	0.83	1.90	0.53
Tipo 3	180	3#4	G	1.05	0.83	0.79	0.53
Tipo 4	160	2#4	G	0.87	0.98	1.13	0.63
Tipo 6	120	1#4	G	0.45	1.23	2.72	0.79
Tipo 7	140	1#4	G	0.48	1.33	2.77	0.85
Tipo 8	160	4#4	C	0.48	0.42	0.87	0.23
Tipo 9	120	2#4	C	0.45	0.53	1.18	0.29
Tipo 10	180	3#4	C	0.70	0.53	0.76	0.29
Tipo 11	160	2#4	C	0.30	0.63	2.12	0.35
Tipo 13	120	1#4	C	0.51	0.79	1.56	0.44
Tipo 14	140	1#4	C	0.48	0.87	1.83	0.48

Tabla 5 Relación entre Deformación Teórica y Deformación experimental de los Muros

Respecto a la comparación de deformaciones máximas de la Tabla 5, los muros en los cuales la relación entre deformación, teórica y experimental de las barras instrumentadas fue mayor a 1.0, coinciden con los muros de menores cuantías y separaciones entre barras.

A continuación, se presenta la Gráfica 6 donde se muestra la relación entre deformación teórica y la deformación experimental de las barras instrumentadas en los diferentes muros:

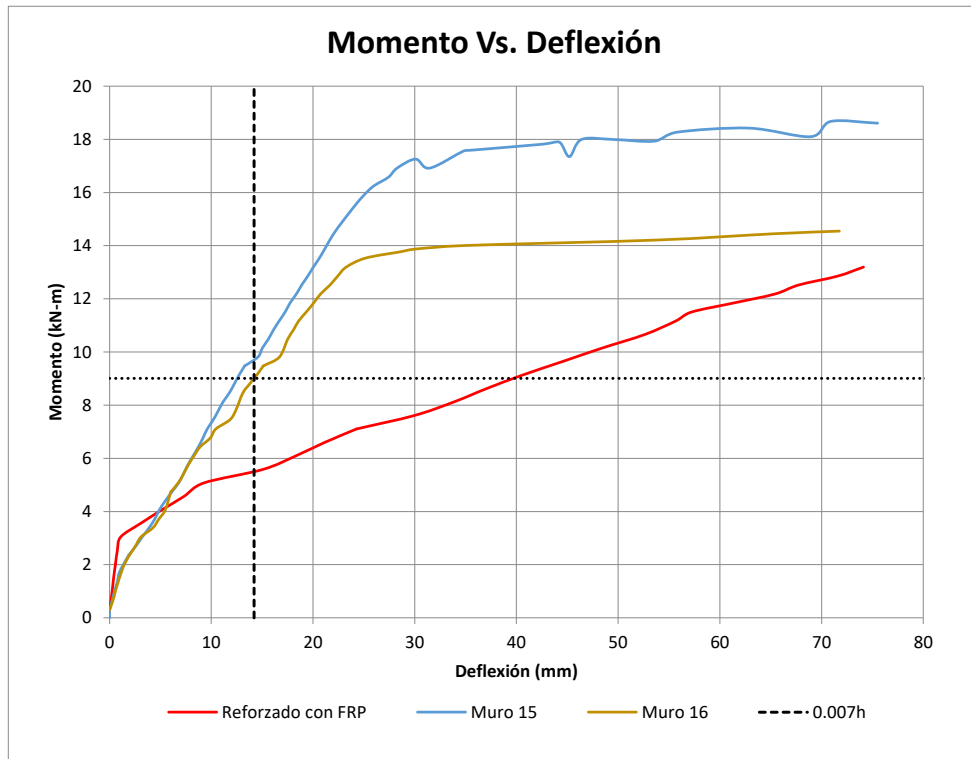


Gráfica 6 Relación entre Deformación Teórica y Deformación Experimental de los Muros

Adicionalmente, por su similitud en geometría y cuantías de refuerzo, se compararon los resultados de la gráfica de Momentos Vs. Deflexión, del muro Tipo 15 y el muro Tipo 16 reforzado con acero, con el muro Tipo 1 reforzados con GFRP. El diseño de los muros reforzados con acero es subreforzado, esperando que su falla se presentara por fluencia en el acero de refuerzo. Los modos de falla en ambos muros fue el esperado.

Se pudo observar que para un desplazamiento máximo permitido en la mampostería reforzada con acero de $0.007h = 14.2 \text{ mm}$, se tiene un momento resistente de 8.2 kN-m . Para este mismo momento, el muro de mampostería de concreto reforzada con GFRP, nos permitiría un desplazamiento máximo de $35.9 \text{ mm} = 0.018h$.

Los valores expuestos anteriormente se resumen en la Gráfica 7:



Gráfica 7 Comparación de Momento Vs. Deflexión de Muro Refezado con FRP y muros Reforzados con Acero

Tal como se observa, los rangos de desplazamientos para los muros reforzados con FRP son mayores que para los muros reforzados con acero convencional, teniendo la ventaja de que antes de la falla nunca se plastificarán las barras de refuerzo y si hay fallas en las piezas de mampostería, estas podrán ser reparadas.

Evaluando la Gráfica 7, se podría decir que los desplazamientos admisibles para los muros de mampostería en concreto reforzados con FRP podrían ser mayores a los calculados de $0.020h$, y llevarlos aproximadamente a $0.030h$, sin embargo, los datos de esta investigación, aún no son suficientes para sustentar estas aseveraciones y se dejarán como recomendación para futuras investigaciones.

8. Conclusiones y Recomendaciones

- Los muros ensayados y presentados en esta investigación, tuvieron un comportamiento monolítico entre sus componentes; mortero de pega, mortero de relleno, refuerzo y mampostería.
- En todos 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. No obstante, se deben realizar más investigaciones para poder especificar una cuantía de refuerzo mínima y una separación entre barras máxima; para que este modo de falla prevalezca.
- Los momentos nominales de los muros reforzados con CFRP comparados con los momentos nominales de los muros reforzados con GFRP, son mayores en promedio un 30%; para cuantías de refuerzo equivalentes.
- Debido a que las cargas de agrietamiento para los muros reforzados con CRFP fueron menores que las cargas de agrietamiento de los muros reforzados con GFRP, es aconsejable reforzar los muros con GFRP; para las cargas que se tuvieron en cuenta en esta investigación. Lo recomendable es no llevar los diseños a condiciones de falla, al presentarse fisuras por aplastamiento, se pierde adherencia entre la pieza de mampostería y el mortero de relleno que envuelve el refuerzo; el sistema puede perder la capacidad de trabajar monolíticamente.
- Los muros de mampostería reforzados con FRP, pueden ser reparados una vez sufran daños en las piezas de mampostería por cargas que les generen efectos de flexión, debido a que las deflexiones no son permanentes ya que su material de refuerzo, no tienen una zona de plasticidad, su comportamiento es elástico hasta la falla.

- Se tuvo una buena aproximación de las capacidades calculadas experimentalmente por medio de los ensayos en el laboratorio con las calculadas teóricamente basadas en los códigos TMS 402-16 y el ACI 440.1R-15.
- Los muros reforzados con FRP, comparados con los muros de mampostería reforzados con acero, permiten mayores deflexiones ante cargas de servicio, presentan menores deflexiones residuales y los costos pueden ser comparables.

Para dar continuidad a esta investigación, se recomienda:

- Plantear un programa experimental para ensayar muros de mampostería en concreto reforzados con FRP, sometidos a cargas cíclicas perpendiculares al plano. De esta forma se apreciará el comportamiento de los muros en condiciones de tensión y compresión para cada una de las caras. Se podrá investigar la capacidad de reponerse ante deflexiones excesivas.
- Investigar el comportamiento ante carga perpendicular al plano y otras sollicitaciones, de otros tipos de mampostería, incluyendo nuevas geometrías, espesores, longitudes y alturas. Revisar que comportamientos se presentan con diferentes relaciones de esbeltez.
- Desarrollar ecuaciones para predecir desplazamientos horizontales basados en el TMS 402-16 y el ACI 440.1R-15. Establecer límites para deflexiones admisibles.
- Continuar validando el protocolo de diseño propuesto para el cálculo del coeficiente de reducción de resistencia, ϕ , para controlar que el modo de falla sea por aplastamiento en la mampostería.
- Dar requerimientos para cuantías mínimas de refuerzo y espaciamientos máximos en las barras de refuerzo.

- Analizar y calcular el límite de deflexiones que pueden tener los muros de mampostería en concreto reforzados con FRP.
- Investigar sobre muros sometidos a fuerzas laterales en su plano.

9. Bibliografía

- Micelli y Nanni. (2001). Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de las barras de FRP. Departamento der Ingeniería Civil de la Universidad de Missouri y el Departamento de Innovación de Ingeniería de la Universidad de Lecce.
- Triwiyono, Nugroho, et al. (2015). Resistencia a la Flexión y Ductilidad de Muros de Mampostería en Concreto Reforzados con Barras de Acero. Yogyakarta, Indonesia. Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, Universidad de Gadjah Mada.
- Hughes Brothers, Inc. (2002). Anclaje de Barras de Refuerzo de GFRP para Ensayos a Tracción. Seward, Nebraska.
- Galati, Tumialán y Nanni. (2005). Reforzamiento con barras de FRP de mampostería no reforzada sometidos a cargas fuera del plano. Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Medio Ambiente de la Universidad de Missouri junto a Simpson Gumpertz & Heger Inc.
- De la Cruz. (2004). Resistencia a la flexión y adherencia en vigas de hormigón armado con barras FRP. Medellín. Universidad Nacional de Colombia.
- Herrera y Madrid. (2003). Manual de Construcción de Mampostería de Concreto. Instituto Colombiano de Productores de Cemento.
- Gaytán. (2003). Compuestos FRP para la Construcción.
<http://www.imcyc.com/cyt/septiembre03/compuestos.htm>
- NSR-10, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. (2010). Asociación de Ingeniería Sísmica. Bogotá D.C.
- ACI 440.1R-15, American Concrete Institute. (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.
- ACI 530, American Concrete Institute. (2013). Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures and Companion Commentaries.

TMS 402, The Masonry Society Building. (2016). Code Requirements And Specification For Masonry Structures.

NTC 111. Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico. (ASTM C 230, ASTM C 109).

NTC 121. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas. (ASTM C 150)

NTC 248. Barras corrugadas de acero al carbono para hormigón reforzado. (ASTM A 615).

NTC 321. Cemento Pórtland. Especificaciones químicas. (ASTM C 150)

NTC 1 299. Aditivos químicos para el concreto. (ASTM C 494).

NTC 3 329. Especificaciones del mortero para unidades de mampostería. (ASTM C 270).

NTC 4 004. Barras de acero de refuerzo con recubrimiento epóxico para refuerzo de concreto. (ASTM A 775).

NTC 4 019. Cal hidratada para mampostería. (ASTM C 270).

NTC 4 020. Agregados para mortero de relleno utilizado en mampostería. (ASTM C 404).

NTC 4 026. Unidades (Bloques y ladrillos) de concreto para mampostería estructural. (ASTM C 90).

NTC 4 048. Lechadas (“grout”) para mampostería. (ASTM C 476).

NTC 4 050. Cemento para mampostería. (ASTM C91).

ASTM D7205. Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars.

Anexo A. Mortero de Pega

Se fundieron cilindros de 50 mm de diámetro por 100 mm de altura y se hicieron los ensayos de compresión inconfiada a los 28 días en el laboratorio, para calcular la resistencia a la compresión f'_{cp} .



Foto 27 Ensayo Cilindros Mortero de Pega

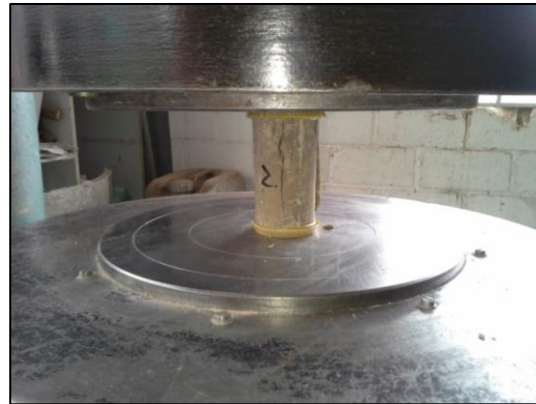


Foto 28 Falla Cilindros Mortero de Pega

Resultados de los ensayos:

Cilindro	Diámetro	Altura	Área	Carga	Resistencia
	mm	mm	mm ²	N	MPa
1	51	99	2042.82	49050	24.01
2	50	100	1963.50	43164	21.98
				Promedio	23.00

Tabla 6 Resultados Ensayos Cilindros Mortero de Pega

Anexo B. Mortero de Relleno

Se fundieron cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura y se hicieron los ensayos de compresión inconfiada a los 28 días en el laboratorio, para calcular la resistencia a la compresión f'_{cr} .



Foto 29 Detalle Falla Cilindros Mortero de Relleno 1



Foto 30 Detalle Falla Cilindros Mortero de Relleno 2



Foto 31 Detalle Falla Cilindros Mortero de Relleno 3



Foto 32 Detalle Falla Cilindros Mortero de Relleno 4

Resultados de los ensayos:

Cilindro	Diámetro	Altura	Área	Carga	Resistencia
	mm	mm	mm ²	N	MPa
1	101	205	8011.85	194238	24.24
2	101	204	8011.85	206991	25.84
3	103	200	8332.29	289591	34.76
4	104	203	8494.87	285667	33.63
				Promedio	29.62

Tabla 7 Resultados Ensayos Cilindros Mortero de Pega

Anexo C. Barras FRP

Se tomaron muestras de 1.20 m de longitud, de cada uno de los tipos de barras. Los extremos de las barras se introdujeron dentro de tubos metálicos de 40 mm de diámetro, 450 mm de longitud y 4 mm de espesor. Los tubos se llenaron con mortero expansivo Cras de Toxement con el fin de dar un anclaje mecánico a la barra. Las barras se ensayaron a tensión por medio de la maquina Universal. Para medir las deformaciones en las barras se utilizaron deformímetros mecánicos.



Foto 33 Llenado de Anclajes con Mortero Expansivo



Foto 34 Ensayo Barras FRP

Después de los ensayos se obtuvieron los siguientes resultados:

a. Barra 1 GFRP

ϕd = 11 mm
Ab = 95 mm²
Lb = 250 mm

Después del ensayo se obtuvieron las siguientes propiedades mecánicas:

f_{fu}	=	916	MPa
E_f	=	58.7	GPa
ϵ_{fu}	=	0.0156	mm/mm



Falla de las fibras de refuerzo y desprendimiento de las mismas de la matriz polimérica

Foto 35 Detalle Falla a Tensión Barra GFRP

La barra presentó una falla frágil en el centro de su luz por efecto de la tensión durante el ensayo.

b. Barra 1 CFRP

Para la caracterización de las barras de CFRP, aunque se siguieron las recomendaciones de la normativa y se hicieron varios ensayos, utilizando materiales epóxicos y morteros con características expansivas para los anclajes, siempre la falla fue por deslizamiento en el anclaje lo cual se consideró aceptable debido que para nuestros diseños las barras de CFRP nunca llegarán a la falla. Por tal razón se tomaron los valores de la ficha técnica.

f_{fu} = 2300 MPa
 E_f = 130 GPa
 ϵ_{fu} = 0.018 mm/mm



Deslizamiento entre
la interfaz de
adherencia del
anclaje y la barra de
CFRP

Foto 36 Detalle Falla a Tensión Barra GFRP

Ficha técnica barras de refuerzo de GFRP

Glasspree 12

TECHNICAL DATA

DIMENSIONS	DIMENSIONS	DIMENSIONI
<ul style="list-style-type: none"> - External Diameter: 12 mm ± 1 mm - Linear weight: 220 g ± 5 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Diamètre: 12 mm ± 1 mm - Poids: 220 g ± 5 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Diametro esterno: 12 mm ± 1 mm - Peso Lineare: 220 g ± 5 %
MATERIALS USED	MATERIELS UTILISE	MATERIALI IMPIEGATI
<p>Glass : Direct "E" Roving</p> <ul style="list-style-type: none"> - Density on fibres: 2,55 g/cm³ - Tensile Strength: > 2000 MPa - Breaking elongation: > 4,4 % - Tensile Elastic modulus: > 70 GPa <p>Resin : vynil ester resin</p> <ul style="list-style-type: none"> - Density: 1,15 g/cm³ - Tensile Strength: > 55 MPa - Breaking elongation: > 2 % <p>Sand : Spheroidal natural quartz-Crystal with trigolar structure</p> <ul style="list-style-type: none"> - Density: 2,65 g/cm³ - Composition: SiO₂> 98 % - Grading curve: 0,15/0,3 mm 	<p>Verre : Roving direct verre "E"</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densité sur les filaments: 2,55 g/cm³ - Résistance à traction: > 2000 MPa - Allongement de rupture: > 4,4 % - Module d'élasticité à traction: > 70 GPa <p>Résine : Résine vynilester</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densité: 1,15 g/cm³ - Résistance à traction: > 55 MPa - Allongement de rupture: > 2 % <p>Sable : Quartz sphéroïdal natural. Cristal à structure trigonal</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densité: 2,65 g/cm³ - Composition: SiO₂> 98 % - Granulométrie : 0,15/0,3 mm 	<p>Vetro : Roving Diretto "E"</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densità delle fibre: 2,55 g/cm³ - Resistenza a trazione: > 2000 MPa - Allungamento a rottura: > 4,4 % - Modulo elastico a trazione:> 70 GPa <p>Resina : resina vinilestere</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densità: 1,15 g/cm³ - Resistenza a trazione: > 55 MPa - Allungamento a rottura: > 2 % <p>Sabbia: Quarzo sferoidale naturale a struttura trigonale</p> <ul style="list-style-type: none"> - Densità: 2,65 g/cm³ - Composizione: SiO₂> 98 % - Granulometria : 0,15/0,3 mm
TECHNICAL CHARACTERISTICS	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	CARATTERISTICHE TECNICHE
<ul style="list-style-type: none"> - Density: 1,9 g/cm³ - Glass content: ≅ 70% - Tensile Strength: ≅ 1000 MPa - Tensile Elastic modulus: ≅ 40 GPa - Ultimate load: ≅ 11 tons 	<ul style="list-style-type: none"> - Densité: 1,9 g/cm³ - Contenu en verre: ≅ 70% - Résistance à traction : ≅ 1000 MPa - Module d'élasticité à traction: ≅ 40 GPa - Charge ultime à traction: ≅ 11 tonnes 	<ul style="list-style-type: none"> - Densità: 1,9 g/cm³ - Contenuto di vetro: ≅ 70% - Resistenza a trazione: ≅ 1000 MPa - Modulo elastico a trazione ≅ 40 GPa - Carico ultimo a trazione: ≅ 11 tons

Ficha técnica barras de refuerzo de CFRP
 Carbopree HS 12

TECHNICAL DATA

DIMENSIONS	DIMENSIONS	DIMENSIONI
- Nominal diameter: 12 mm - Linear weight: 180 g ± 10%	- Diamètre nominal: 12 mm - Poids: 180 g ± 10%	- Diametro nominale: 12 mm - Peso lineare: 180 g ± 10%
MATERIALS USED	MATERIAUX UTILISES	MATERIALI IMPIEGATI
Carbon fiber - Density of fibers: 1.8 ± 0.1 g/cm ³ - Tensile Strength: 4000 MPa - Elongation: 1.6 % - Elastic modulus: 230 Gpa Vynilester resin - Density: 1.0 ± 0.1 g/cm ³ - Tensile Strength: 75 MPa - Breaking elongation: 4.30% Sand: Spheroidal natural quartz-Crystal with trigonal structure - Density: 2.6 ± 0.1 g/cm ³ - Composition: SiO ₂ ≥ 99.80%	Carbone - Densité sur les filaments: 1.8 ± 0.1 g/cm ³ - Résistance à traction: 4000 MPa - Allongement: 1.6 % - Module d'élasticité: 230 GPa Résine vynilester - Densité: 1.0 ± 0.1 g/cm ³ - Résistance à traction: 75 MPa - Allongement à rupture: 4.30% Sable: Quartz sphéroidal naturel. Cristal à structure trigonal - Densité: 2.6 ± 0.1 g/cm ³ - Composition: SiO ₂ ≥ 99.80%	Carbonio - Densità delle fibre: 1.8 ± 0.1 g/cm ³ - Resistenza a trazione: 4000 MPa - Allungamento: 1.6 % - Modulo elastico: 230 GPa Resina vinilestere - Densità: 1.0 ± 0.1 g/cm ³ - Resistenza a trazione: 75 MPa - Allungamento a trazione: 4.30% Sabbia: Quarzo sferoidale naturale a struttura trigonale - Densità: 2.6 ± 0.1 g/cm ³ - Composizione: SiO ₂ ≥ 99.80%
TECHNICAL CHARACTERISTICS	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	CARATTERISTICHE TECNICHE
- Average tensile strength: 2300MPa - Average tensile modulus of elasticity, ASTM D3039: 130 GPa - Characteristic tensile strength, f_{fu}^* ACI 440, $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$, ASTM D3039: 1800 MPa - Average ultimate deformation, ASTM D3039: 1.8%	- Résistance à traction moyenne: 2300MPa - Module d'élasticité à traction moyen, ASTM D3039: 130 Gpa - Résistance à traction caractéristique, f_{fu}^* ACI 440, $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$, ASTM D3039: 1800 Mpa - Déformation ultime moyenne, ASTM D3039: 1.8%	- Resistenza alla trazione media: 2300MPa - Modulo elastico a trazione medio ASTM D3039: 130 Gpa - Resistenza a trazione caratteristica, f_{fu}^* ACI 440, $f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma$, ASTM D3039: 1800 MPa - Deformazione ultima media, ASTM D3039: 1.8%
STANDARD PACKAGING	EMBALLAGE STANDARD	IMBALLAGGIO STANDARD
- straight bars packed in bundles of 10 pieces with the following dimensions: 10 cm x 10 cm x length 6 m 10 cm x 10 cm x length 12 m Other packaging dimensions can be agreed.	- barres droites en palettes composés de n. 10 pièces avec les suivantes dimensions: 10 cm x 10 cm x longueur 6 m 10 cm x 10 cm x longueur 12 m Emballages avec autres dimensions peuvent être considérés.	- barre dritte in fasci composti da n. 10 pezzi con le seguenti dimensioni: 10 cm x 10 cm x 6 m di lunghezza 10 cm x 10 cm x 12 m di lunghezza Imballi aventi altre dimensioni possono essere realizzati su richiesta.

Anexo D. Mortero Expansivo

Ficha técnica mortero expansivo utilizado para el anclaje de las barras de FRP durante los ensayos de caracterización del material.



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
 PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
 E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
 www.toxement.com.co

<p>CRAS</p> <p>Agente demoledor no explosivo</p> <p style="text-align: right;">TX40T232</p>
--

DESCRIPCION

CRAS es un producto en polvo que al ser mezclado con agua, produce una reacción expansiva que es capaz de demoler cualquier tipo de roca o concreto.

- Altos ahorros en gastos por vigilancia armada al ser almacenado como otro material de construcción.
- CRAS es seguro y ecológico.

INFORMACION TECNICA

Color : Gris claro
 Densidad de la relación agua/producto 0.26 : 1.99 kg/l
 Densidad de la relación agua/producto 0.3 : 2.00 kg/l

RENDIMIENTO

La siguiente tabla muestra en consumo por metro lineal de perforación, según el diámetro de barreno utilizado:

Diámetro del barreno	30 mm	36 mm	40 mm	46 mm	60 mm
Consumo por metro lineal	1.2 kg	1.6 kg	2.0 kg	2.4 kg	2.8 kg

USOS

CRAS es utilizado en la demolición de roca, mármol, granito y concreto. Cuando se requiere demoler elementos conformados por concreto armado, se deben planificar cortes del acero debilitándolo, aumentando la posibilidad de éxito del agente demoledor.

APLICACION

Perforaciones

Por medio de un taladro, se realizan las perforaciones requeridas de acuerdo con el elemento a demoler, disponiendo las perforaciones en forma lineal. La distancia entre perforaciones debe ser máximo de 10 veces el diámetro del barreno utilizado si se requiere que la reacción se de entre las 12 y 24 horas, o 15 veces el diámetro si la ruptura puede esperar, en este caso el consumo de producto es menor. Así, para un diámetro de 30 mm, la distancia máxima entre perforaciones debe ser de 30 cm. A mayor diámetro, menor tiempo de reacción. El tipo de taladro utilizado debe ser correspondiente al trabajo a realizar, para trabajos pequeños se puede utilizar un taladro eléctrico, para trabajos mayores taladro neumático y para megaproyectos se recomienda utilizar un "Track - driller" para optimizar rendimientos.

VENTAJAS

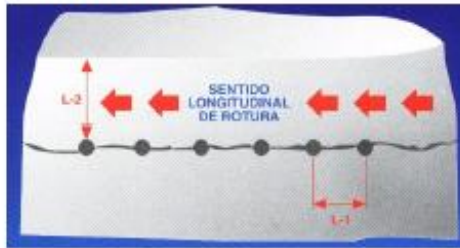
- Permite fracturar los materiales más utilizados en la construcción, con una fuerza expansiva superior a las 7000 TM, debiendo indicar que generalmente son suficientes de 1500 a 3000 TM para demoler cualquier tipo de roca y concreto.
- Su fuerza expansiva mayor a 7000 TM permite demoler todo tipo de concreto, piedra, ladrillo y adoquín para los cuales se hace necesario solo una fuerza expansiva entre 1500 y 3000 TM.
- Excepto por el ruido causado al realizar las perforaciones, la acción del CRAS es totalmente silenciosa y exenta de vibración.
- Las precauciones que deben tomarse con otros explosivos, no son necesarias con el uso de CRAS.
- Las grietas y demoliciones son totalmente dirigidas y controladas, opuesto a los explosivos tradicionales.
- CRAS puede ser utilizado bajo agua o en rocas con fisuras, encapsulándolo previamente.
- Ideal para utilizar en demolición controlada como cortes en minas de granito o mármol.
- No genera microfisuras en las láminas (demolición controlada), evitando desperdicios y altos costos por material de desecho.
- Su transporte es seguro y de bajo valor asegurado.

CORTE TRANSVERSAL



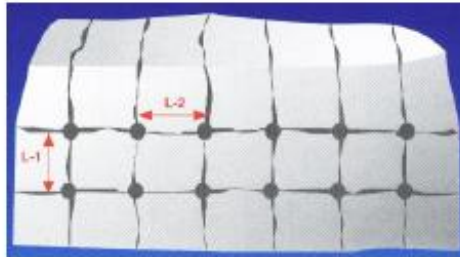
$L-1 < L-2$

CORTE LONGITUDINAL



$L-1 < L-2$

CORTE EN CUADRICULA



$L-1 = L-2$

En el caso de elementos sueltos, se debe perforar el 85% del total de la longitud del elemento a demoler; en el caso de elementos enterrados, se debe perforar el 105%, es decir un 5% más abajo del nivel.

En el caso de concreto armado, se deben realizar las perforaciones teniendo en cuenta el plano del acero de refuerzo, se recomienda cortar primero las varillas o flejes para permitir un correcto trabajo del CRAS.

Mezcla y llenado de las perforaciones

Mezclar el CRAS con un mínimo del 26% y un máximo de 30% de agua (260 ml - 300 ml por cada kg de CRAS) hasta garantizar una mezcla homogénea, agregando lentamente el CRAS al agua. A menor cantidad de agua, más rápida la reacción.

Una vez obtenga una mezcla homogénea y sin grumos, llenar las perforaciones totalmente.

Debido a que la mezcla es fluida, se debe tratar en lo posible de realizar las perforaciones verticales o inclinadas.

En el caso de que se requiera llenar perforaciones horizontales, se recomienda utilizar una bomba de carga, taponando los agujeros una vez llenos, mientras el producto seca y luego retirar los tapones.

Es necesario proteger el elemento a demoler de la lluvia con un plástico, sin embargo no se recomienda taponar los agujeros ya que esto puede ocasionar que el CRAS no reaccione.

Reacción

La presión expansiva de CRAS se desarrolla de manera progresiva y proporcional al tiempo transcurrido desde la carga. La potencia aumenta a medida que transcurre el tiempo.

Las primeras fisuras se podrán apreciar a las 6 horas, dependiendo de la temperatura ambiente, de la cantidad de agua utilizada y del diámetro del barrenado. La mayor fuerza expansiva se logrará a las 24 horas, excepto en climas muy fríos donde la reacción puede demorar más tiempo. En estos casos se recomienda calentar un poco el agua sin exceder los 12°C.

RECOMENDACIONES ESPECIALES

- Se deben realizar las perforaciones según las instrucciones para garantizar el resultado.
- El agua de mezclado no debe exceder los 10°C.
- Para una completa reacción del CRAS, la mezcla debe ser homogénea, sin grumos; los agujeros deben estar libres de agua, polvo y otras partículas.



Calle 20 C No. 43 A - 52 Int. 4
PBX 2088600 Fax: 3680887 Bogotá D.C.
E-mail: atencioncliente@toxement.com.co
www.toxement.com.co

- La carga debe realizarse inmediatamente después de preparar el producto; el máximo tiempo de manejabilidad es de 15 minutos; la mezcla sobrante no es recuperable ni se debe almacenar.
- El mínimo diámetro de barreno utilizado debe ser de 30 mm, si se utiliza un diámetro menor es posible que CRAS no actúe.
- En clima cálido conviene efectuar la carga de CRAS en horas de menor temperatura, preferiblemente en la mañana.

variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previo a su empleo en gran escala.

EUCLID - TOXEMENT se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo.

PRECAUCIONES

- Nunca llenar botellas o depósitos de acero con la mezcla de CRAS.
- No se debe observar dentro de las perforaciones llenadas durante el tiempo de reacción, ya que se puede presentar el efecto sifón y salir bruscamente la mezcla del agujero. En general el sifón se presenta por utilizar agua caliente para la mezcla, utilizar el CRAS UNIVERSAL en barrenos de más de 50 mm o debido a que la mezcla no quedó homogénea.
- Para el mezclado se deben utilizar siempre guantes, gafas de seguridad y mascarilla.

Septiembre 1 de 2011

ALMACENAMIENTO

CRAS debe almacenarse en su empaque original, herméticamente cerrado, bajo techo, sobre estibas, protegido del sol, la lluvia y la humedad del ambiente.

Por ser un material nocivo para la salud, es imprescindible el uso de protección como guantes, gafas o careta y respirador con filtro para polvos.

Vida útil de almacenamiento: 2 años.

Nota: De acuerdo a nuestra Política de Devoluciones, una vez despachado este material, solo se podrá hacer devolución máximo un mes después de haber sido recibido por el cliente.

PRESENTACION

Bolsa 25 kg

Las Hojas Técnicas de los productos EUCLID - TOXEMENT pueden ser modificadas sin previo aviso. Visite nuestra página Web www.toxement.com.co para consultar la última versión.

Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de la

Cras

Página 3

Anexo E. Muretes de Mampostería en Concreto

Se construyeron 6 muretes, tres de ellos con las celdas vacías y los otros tres con las celdas llenas y se fallaron a compresión para calcular el $f'm$.



Foto 37 Muretes con Celdas Vacías y Llenas

El bloque Kreato de concreto con que se construyeron los muros tiene las siguientes características:



BLOQUE 14

Acabados: Gris y color

Presentaciones: Estándar y para partir

Medidas: 14 x 19 x 39 cm

Rendimiento: 12,5 und/m²

Usos: Mampostería arquitectónica

Figura 5 Características Bloque 14 Kreato

Los valores promedios de: P máx, f'm y Em en los muretes de mampostería en concreto con celdas vacías y llenas fueron los siguientes:

Murete con Celdas	P máx (kN)	f'm (MPa)	Em (MPa)
Vacías	513.4	6.4	6716
Llenas	800	10.1	20213

Tabla 8 Resumen Resultado Ensayos Muretes

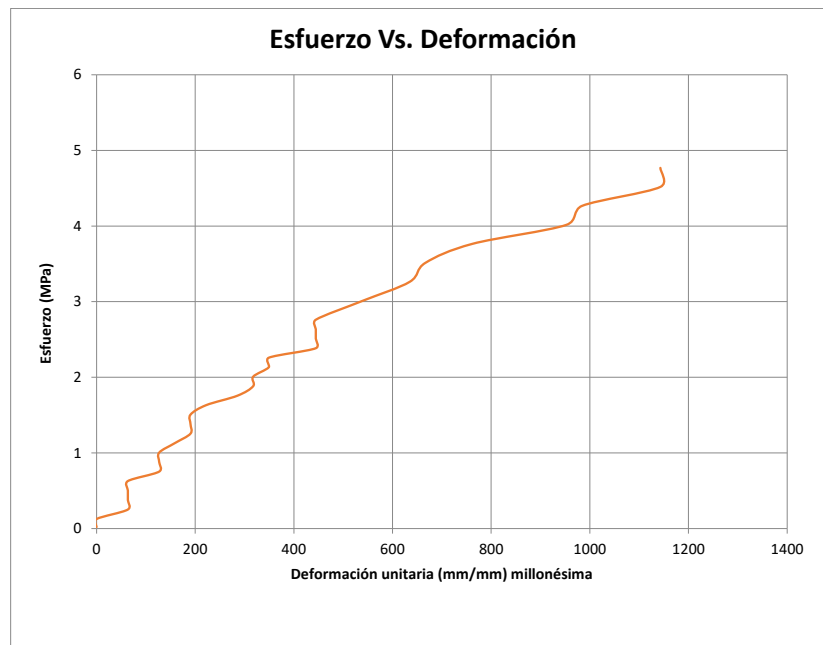
a. Ensayo a Compresión Murete 1

Murete con 3 celdas sin rellenar

Alto: 389 mm

Largo: 590 mm

Espesor: 140 mm



Gráfica 8 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 1

P máx: 39910 kgf

f'm: 5.01 MPa

Em: 7159 MPa

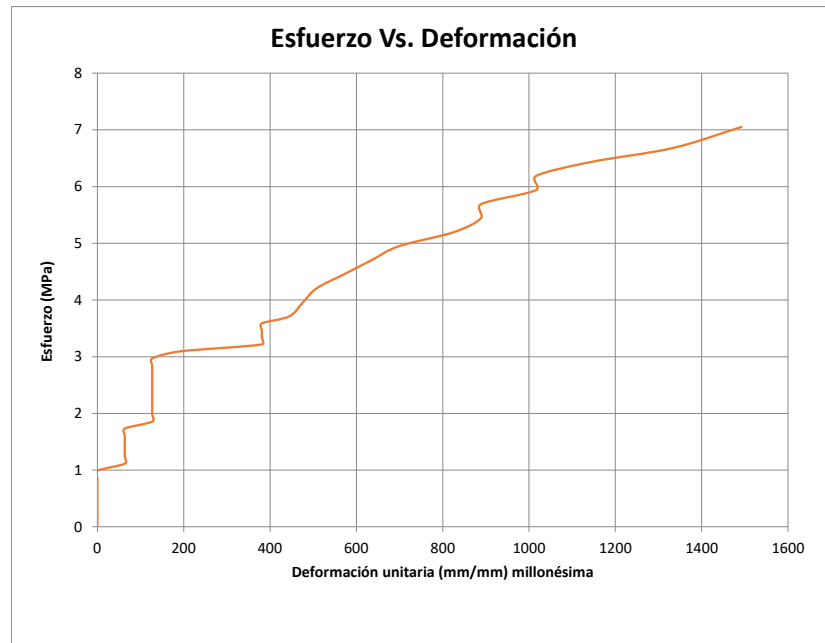
b. Ensayo a Compresión Murete 2

Murete con 3 celdas sin rellenar

Alto: 395 mm

Largo: 600 mm

Espesor: 140 mm



Gráfica 9 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 2

P máx: 57440 kgf

f'm: 7.11 MPa

Em: 5261 MPa

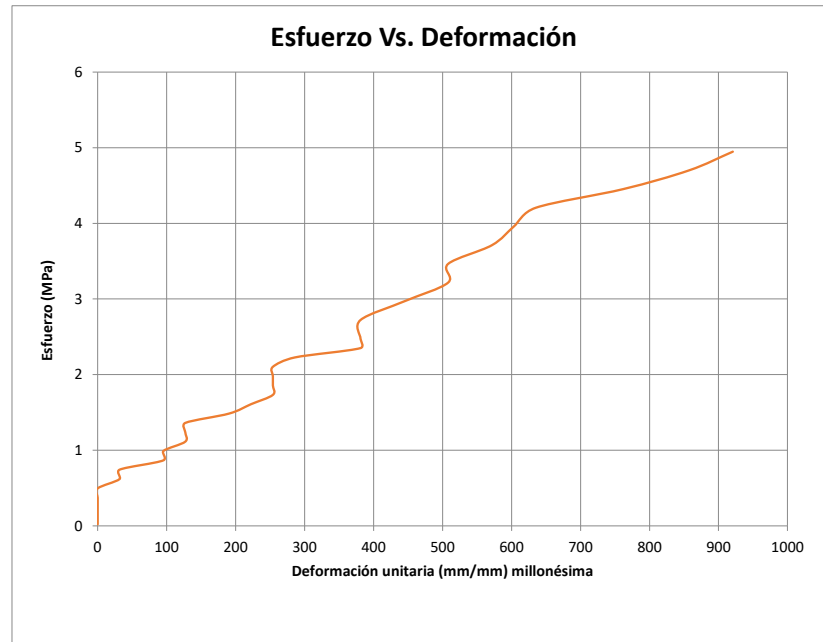
c. Ensayo a Compresión Murete 3

Murete con 3 celdas sin rellenar

Alto: 395 mm

Largo: 600 mm

Espesor: 140 mm



Gráfica 10 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 3

P máx: 56670 kgf

f'm: 7.01 MPa

Em: 7728 MPa

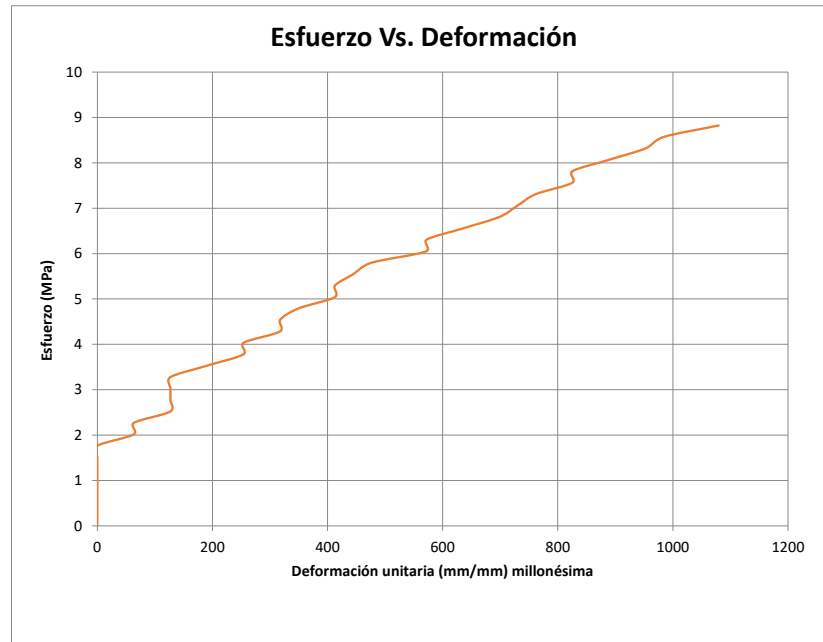
d. Ensayo a Compresión Murete 4

Murete con 3 celdas llenas

Alto: 400 mm

Largo: 590 mm

Espesor: 140 mm



Gráfica 11 Esfuerzo Vs. Deformación Murete 4

P máx: 80000 kgf

f'm: 10.08 MPa

Em: 20213 MPa

El murete no falló a compresión.

	FICHA TÉCNICA		Fecha: Enero 2016		
			Codigo: BE14		
			Versión: 001 - 2016		
	Referencia Externa	Referencia Kreato	Nombre		
	No Aplica	BE14	BLOQUE DE CEMENTO LISO 14X19X39		
	ESPECIFICACIONES				
	DIMENSIONES	LARGO	ANCHO	ALTO	
		39 cm	14 cm	19 cm	
	COLOR	Gris - Ocre - Amarillo - Blanco - Negro - Arena - Chocolate - Rojo - Verde - Terracota			
	TEXTURA	Lisa			
	PESO SECO	12.8 Kg/un			
	RENDIMIENTO	12.5 un/m2			
	MÓDULO ROTURA- Promedio	min 13 Mpa.			
	MÓDULO ROTURA- Unidad	min 11 Mpa.			
	ALMACENAMIENTO Y MANEJO				
	<p>Los bloques no deben quedar acopiados directamente sobre el piso. Esto puede generar contaminación de las piezas por capilaridad. Debe cubrirse con plástico para evitar el humedecimiento. La altura de los acopios no debe superar los 1.60 m. Esto por seguridad y facilitar la manipulación. El trasiego debe hacerse con los equipos adecuados. El trasiego en carretillas o manual deteriora las piezas.</p>				
	OBSERVACIONES				
<p>Con o sin núcleo central para sacar medias piezas. El 5% del envío puede tener pequeñas fisuras o desportilladuras no mayores a 13mm en cualquier dimensión, o fisuras de no más de 0,5mm de ancho y una longitud máxima del 25% de la altura nominal de la unidad.</p>					
RESISTENCIA A LA ABRASIÓN					
TOLERANCIAS	LONGITUD	± 2 mm.			
	ANCHO	1% max.			
	ESPESOR	1% max.			
USO Y APLICACIÓN		Mampostería Estructural y no Estructural			
NORMATIVIDAD APLICADA		NTC 4026 - NTC 4076 - NTC 4024 - ASTM C 90 ASTM C129 - ASTM C140			
Gerencia Técnica - Ing. Luis Alfonso Ortiz M.		Gerencia General KREATO			

Anexo F. Resultados de los Ensayos para Muros de Mampostería

En los laboratorios de la ECI se hizo la totalidad de los ensayos que se muestran a continuación.

Se mostrará para cada uno de los muros las gráficas de:

- Deflexión en el centro del muro reforzado.

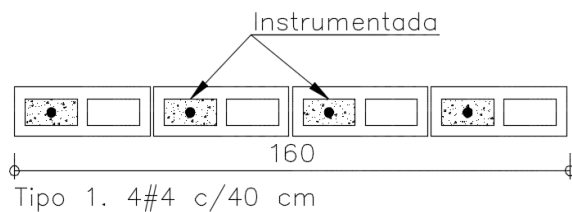
Cada una de las anteriores gráficas en función de la fuerza aplicada. Se mostrará una tabla resumen con los valores máximos de:

- Cargas.
- Momentos
- Deflexiones
- Deformación unitaria en las barras de refuerzo.
- Carga de agrietamiento.

a. Muro Tipo 1 GFRP

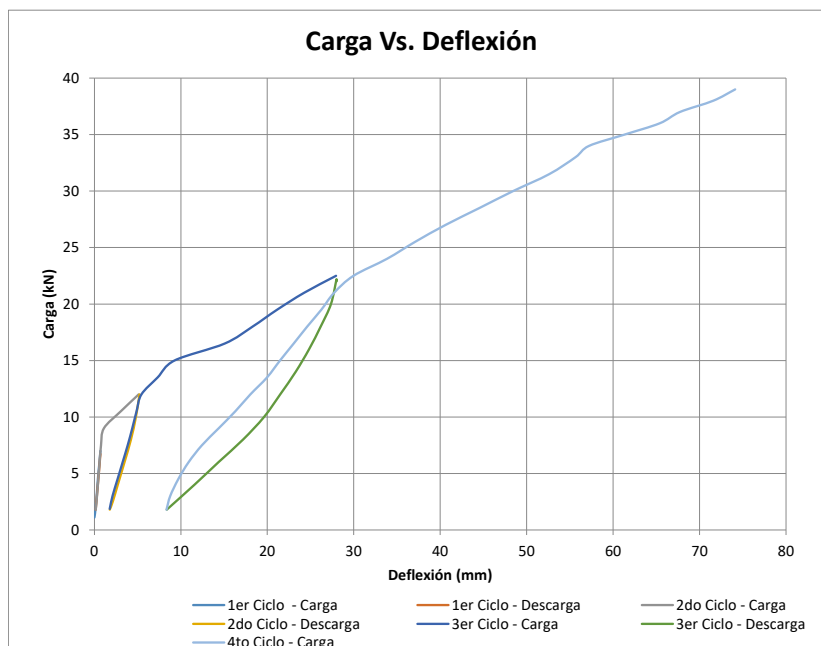
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en fibra de vidrio.

Fecha del ensayo: septiembre 14 de 2016.



Carga	39.0	kN
Momento	13.2	kN-m
Deflexión	74.1	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.89	%
Carga de Agrietamiento	9.0	kN

Tabla 9 Valores Máximos Experimentales MT1

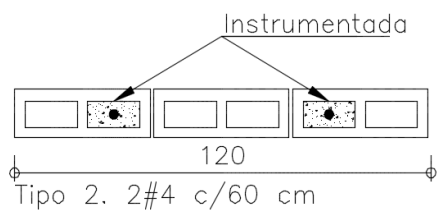


Gráfica 12 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT1

b. Muro Tipo 2 GFRP

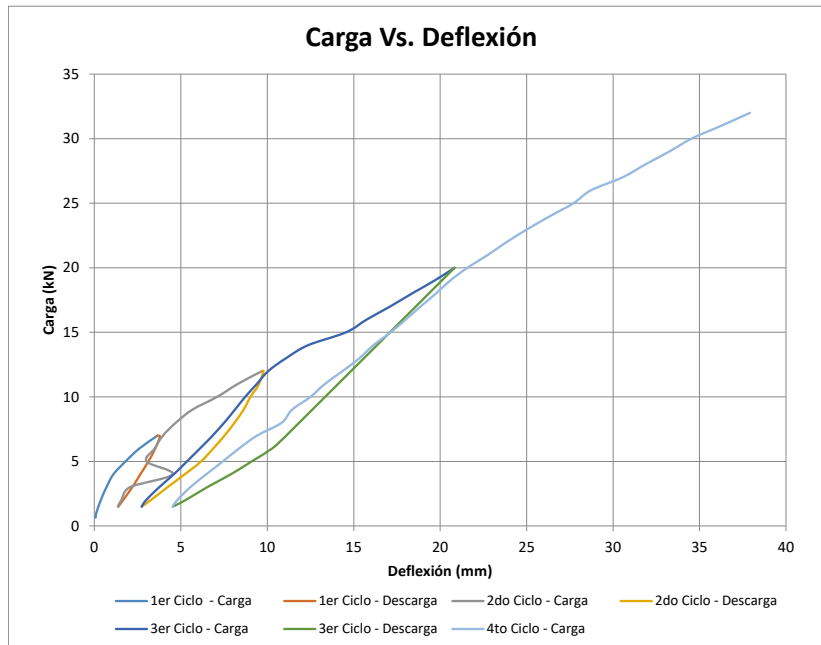
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en fibra de vidrio.

Fecha del ensayo: octubre 11 de 2016



Carga	32.0	kN
Momento	10.8	kN-m
Deflexión	37.9	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.44	%
Carga de Agrietamiento	6.50	kN

Tabla 10 Valores Máximos Experimentales MT2

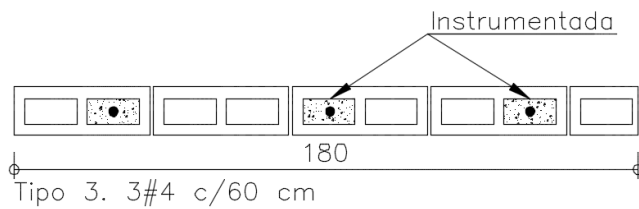


Gráfica 13 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT2

c. Muro Tipo 3 GFRP

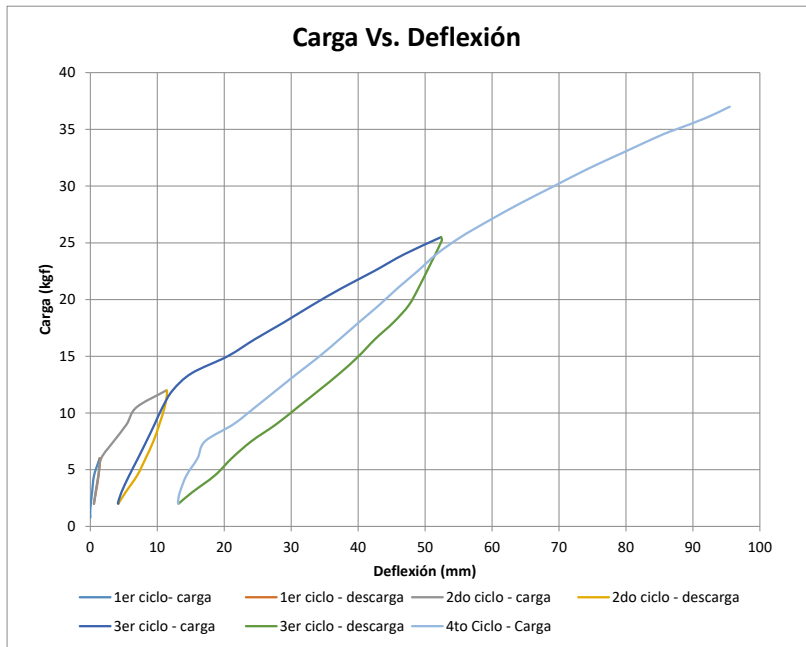
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en fibra de vidrio.

Fecha del ensayo: septiembre 16 de 2016



Carga	37.0	kN
Momento	12.5	kN-m
Deflexión	95.5	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	1.05	%
Carga de Agrietamiento	5.50	kN

Tabla 11 Valores Máximos Experimentales MT3



Gráfica 14 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT3



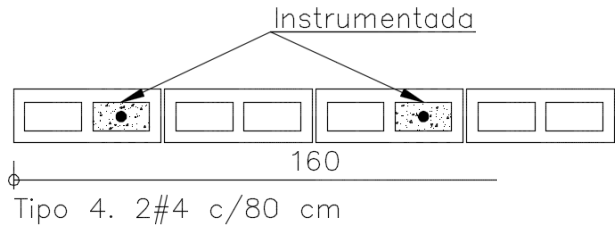
Deflexión de 87 mm en el muro

Foto 38 Deflexión del Muro

d. Muro Tipo 4 GFRP

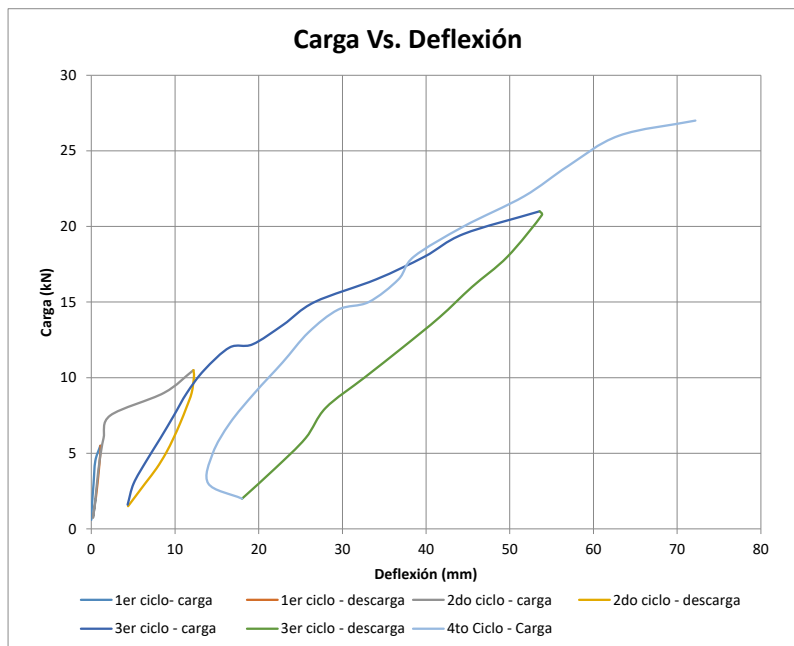
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en fibra de vidrio.

Fecha del ensayo: septiembre 13 de 2016



Carga	27.0	kN
Momento	9.1	kN-m
Deflexión	72.2	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.87	%
Carga de Agrietamiento	7.5	kN

Tabla 12 Valores Máximos Experimentales MT4

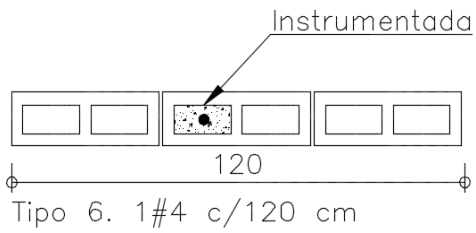


Gráfica 15 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT4

e. Muro Tipo 6 GFRP

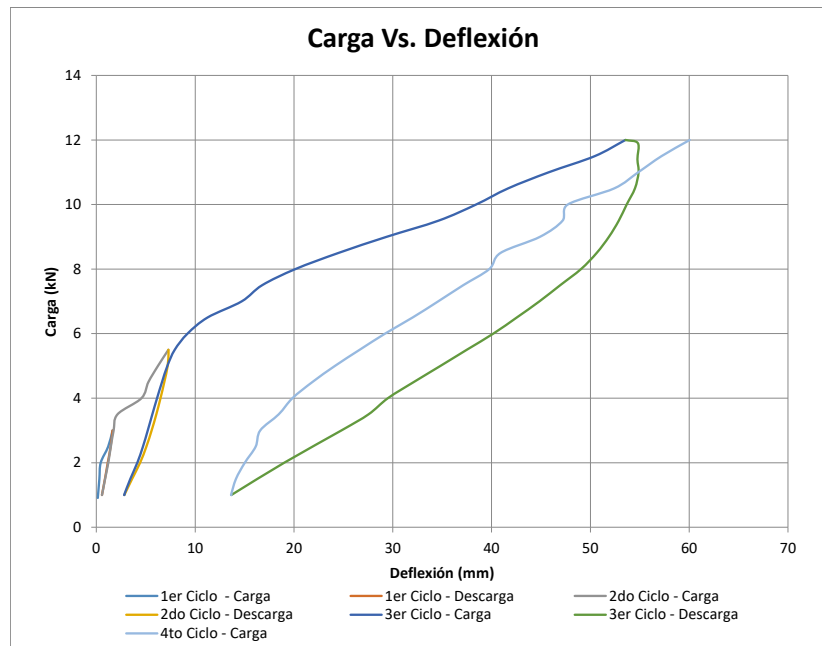
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en fibra de vidrio.

Fecha del ensayo: octubre 10 de 2016



Carga	12.0	kN
Momento	4.1	kN-m
Deflexión	53.5	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.45	%
Carga de Agrietamiento	2.70	kN

Tabla 13 Valores Máximos Experimentales MT6



Gráfica 16 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT6



Foto 39 Fisuras Según Cargas



Foto 40 Línea de Plomada Antes de Desplazamientos

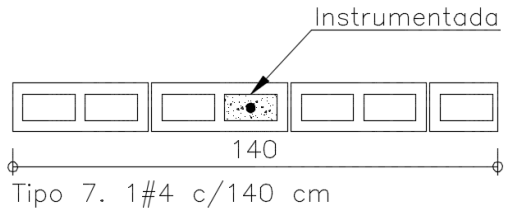


Foto 41 Deflexión del Muro

f. Muro Tipo 7 GFRP

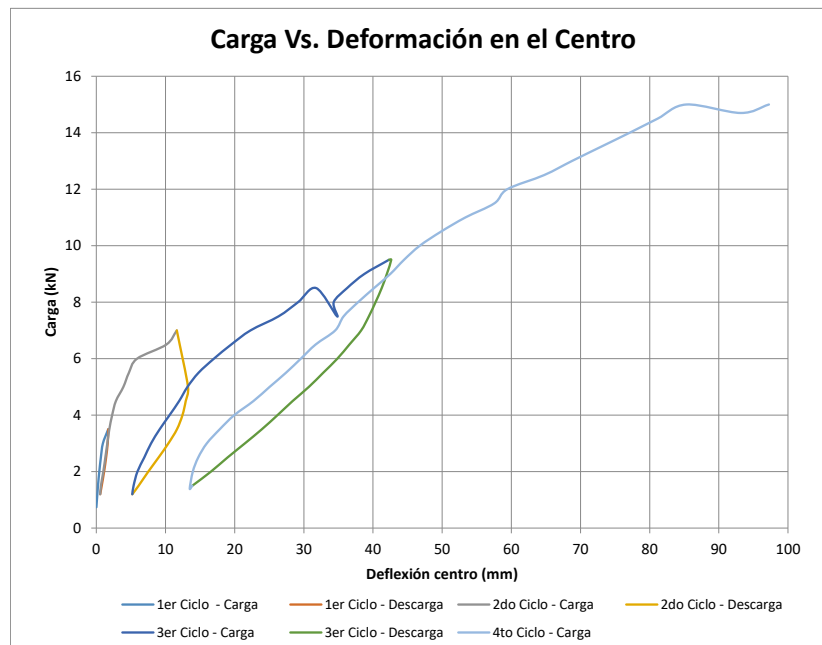
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en fibra de vidrio.

Fecha del ensayo: octubre 10 de 2016



Carga	15.0	kN
Momento	5.1	kN-m
Deflexión	97.2	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.48	%
Carga de Agrietamiento	6.0	kN

Tabla 14 Valores Máximos Experimentales MT7



Gráfica 17 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT7



Foto 42 Fisuras Según Cargas



Foto 43 Línea de Plomada Antes de Desplazamientos



Foto 44 Línea de Plomada Después de Cargas

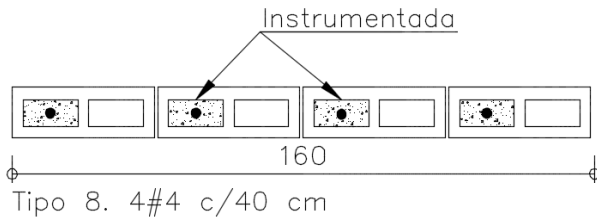


Foto 45 Deflexión del Muro

g. Muro Tipo 8 CFRP

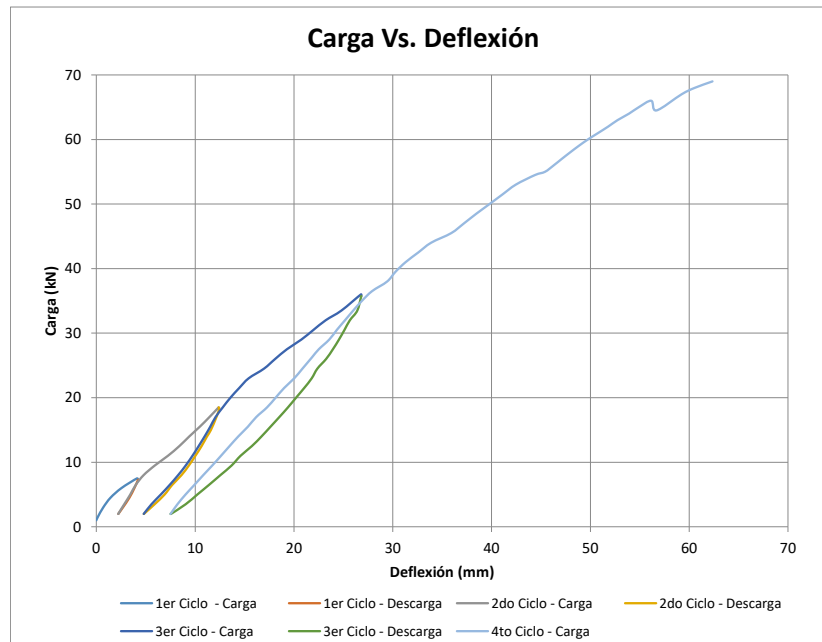
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en carbono.

Fecha del ensayo: septiembre 19 de 2016



Carga	69.0	kN
Momento	23.3	kN-m
Deflexión	62.3	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.48	%
Carga de Agrietamiento	4.5	kN

Tabla 15 Valores Máximos Experimentales MT8



Gráfica 18 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT8



Foto 46 Línea de Plomada Antes de Desplazamientos

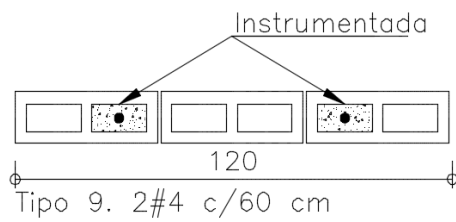


Foto 47 Deflexión del Muro

h. Muro Tipo 9 CFRP

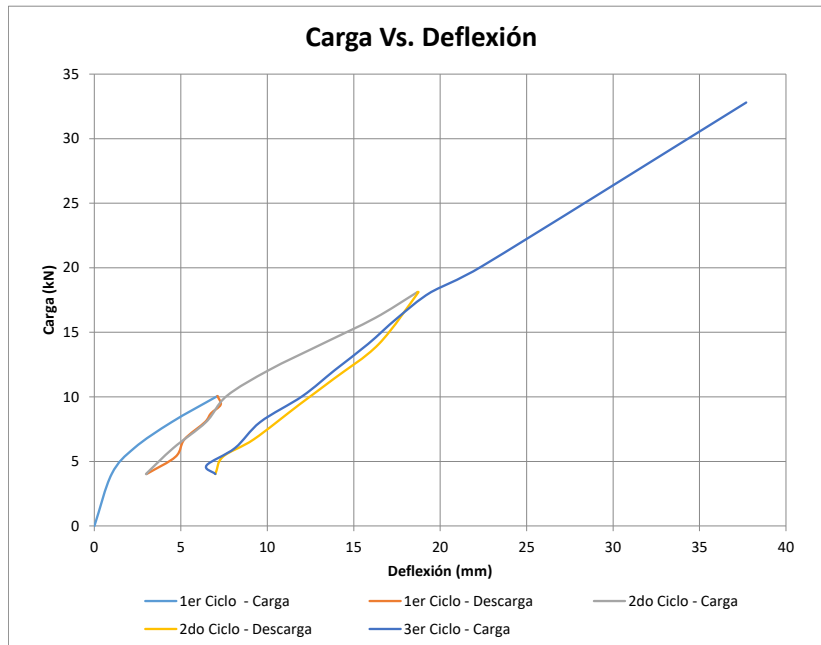
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en carbono.

Fecha del ensayo: mayo 2 de 2016



Carga	32.8	kN
Momento	11.1	kN-m
Deflexión	37.7	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.45	%
Carga de Agrietamiento	6.0	kN

Tabla 16 Valores Máximos Experimentales MT9

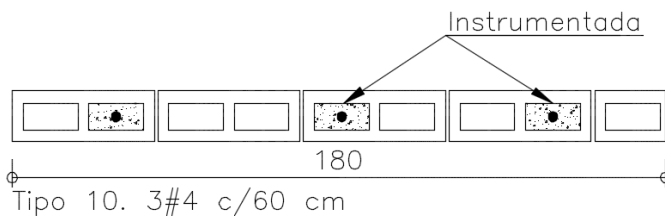


Gráfica 19 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT9

i. Muro Tipo 10 CFRP

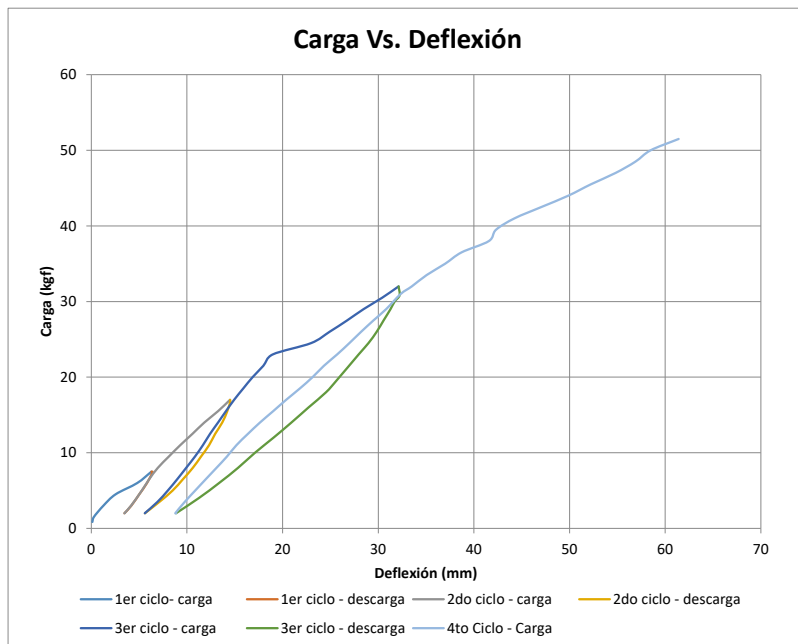
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en carbono.

Fecha del ensayo: septiembre 20 de 2016



Carga	51.5	kN
Momento	17.4	kN-m
Deflexión	61.4	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.70	%
Carga de Agrietamiento	4.2	kN

Tabla 17 Valores Máximos Experimentales MT10

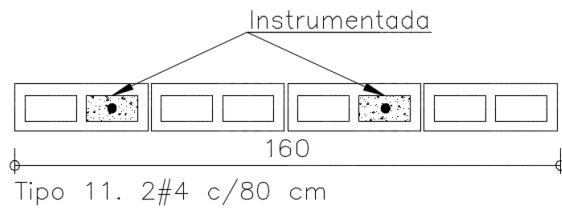


Gráfica 20 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT10

j. Muro Tipo 11 CFRP

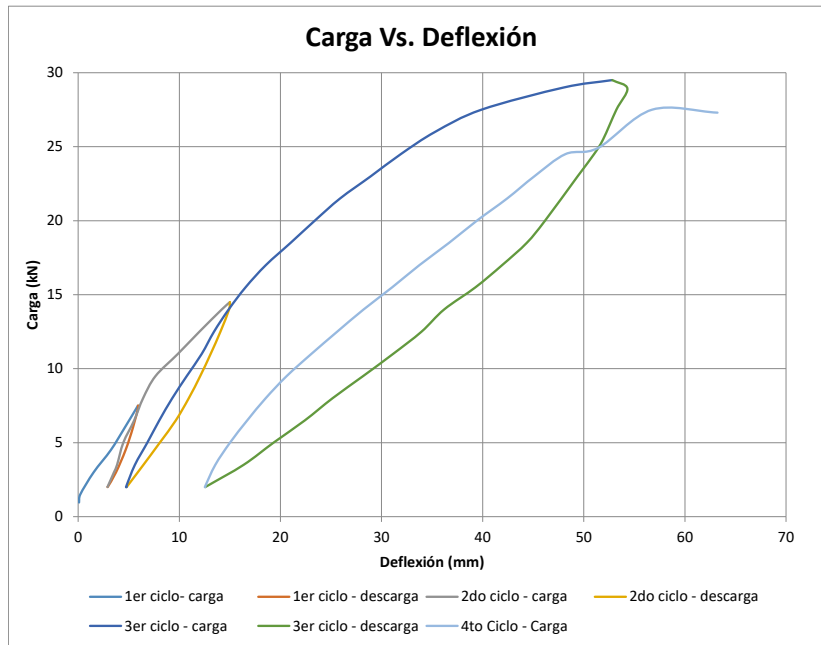
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en carbono.

Fecha del ensayo: septiembre 19 de 2016



Carga	29.5	kN
Momento	10.0	kN-m
Deflexión	52.8	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.30	%
Carga de Agrietamiento	4.70	kN

Tabla 18 Valores Máximos Experimentales MT11

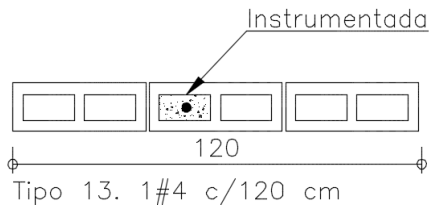


Gráfica 21 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT11

k. Muro Tipo 13 CFRP

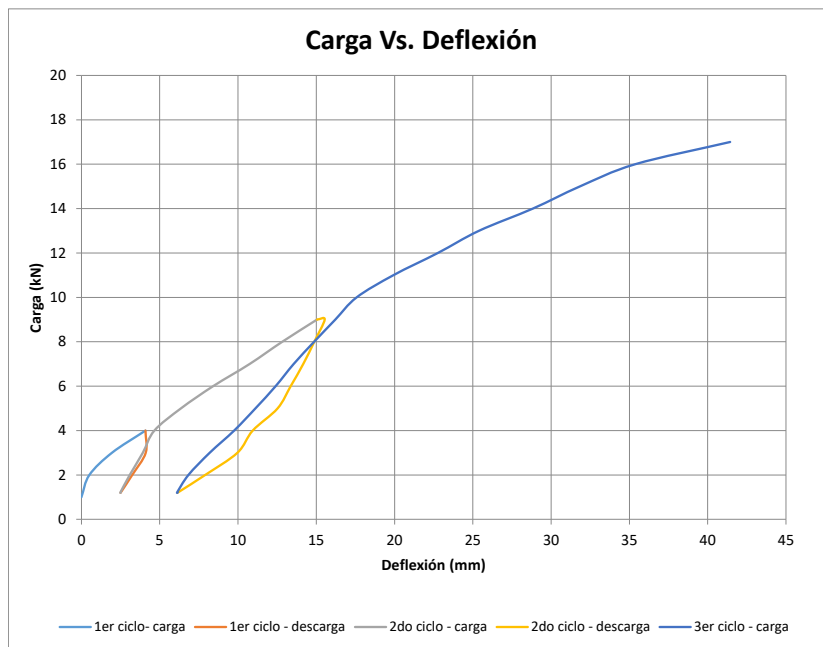
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en carbono.

Fecha del ensayo: octubre 9 de 2016



Carga	17.0	kN
Momento	5.8	kN-m
Deflexión	41.4	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.51	%
Carga de Agrietamiento	3.9	kN

Tabla 19 Valores Máximos Experimentales MT13



Gráfica 22 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT13



Foto 48 Fisuras Según Cargas

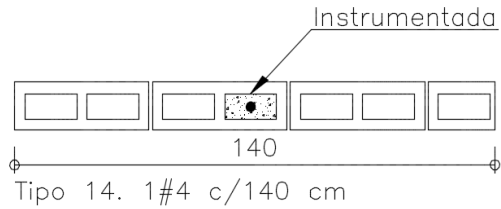


Foto 49 Línea de Plomada Después de Cargas

I. Muro Tipo 14 CFRP

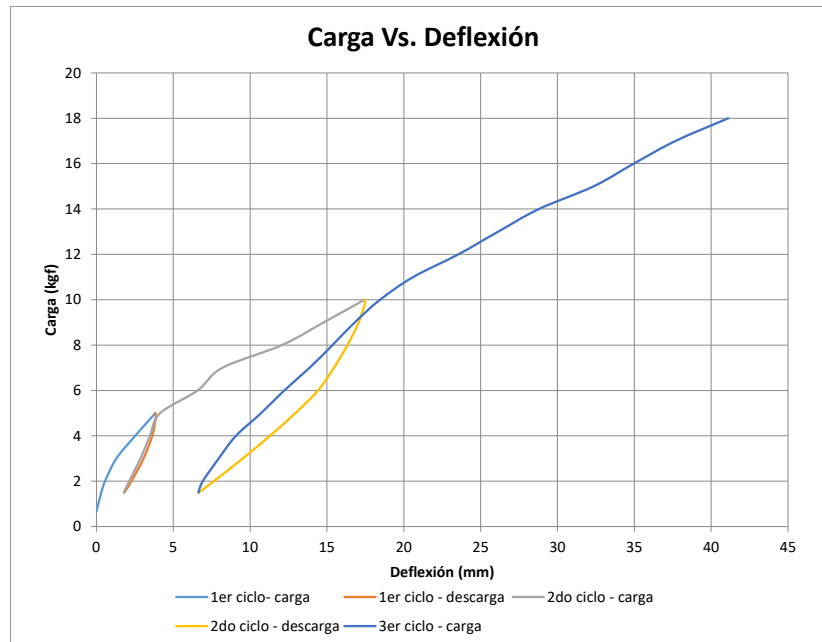
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en carbono.

Fecha del ensayo: septiembre 20 de 2016



Carga	18.0	kN
Momento	6.1	kN-m
Deflexión	41.1	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.48	%
Carga de Agrietamiento	3.1	kN

Tabla 20 Valores Máximos Experimentales MT14

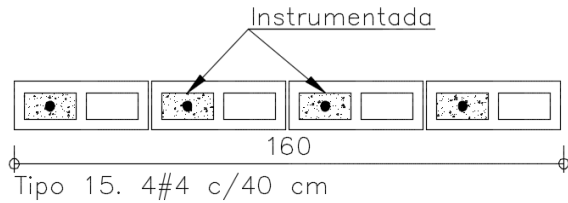


Gráfica 23 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT14

m. Muro Tipo 15 Acero

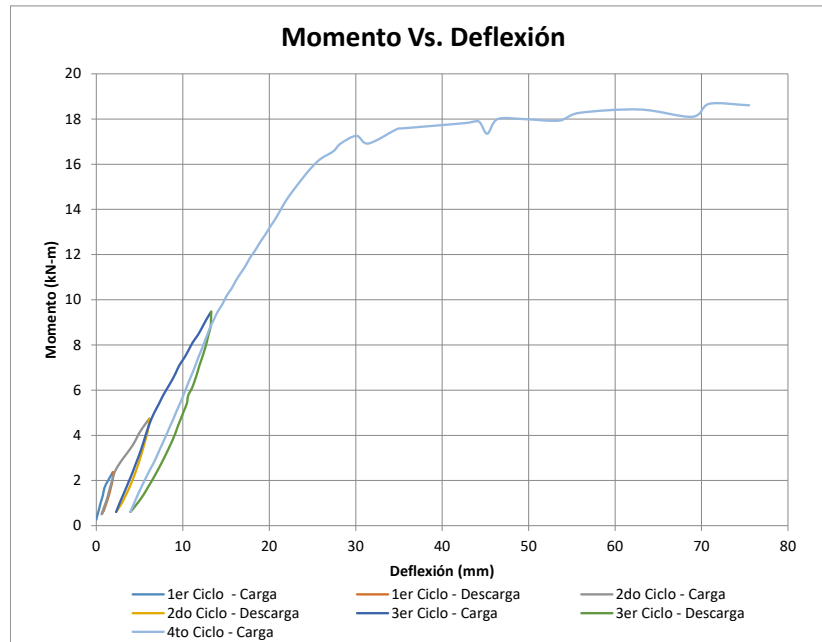
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en acero.

Fecha del ensayo: octubre 19 de 2016



Carga	55.0	kN
Momento	18.6	kN-m
Deflexión	75.5	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.39	%
Carga de Agrietamiento	5.5	kN

Tabla 21 Valores Máximos Experimentales MT15

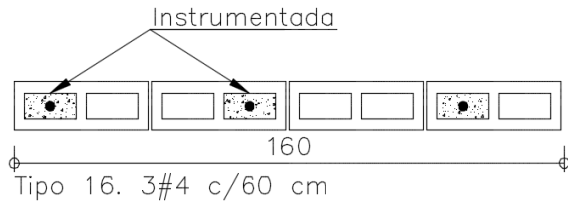


Gráfica 24 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT15

n. Muro Tipo 16 Acero

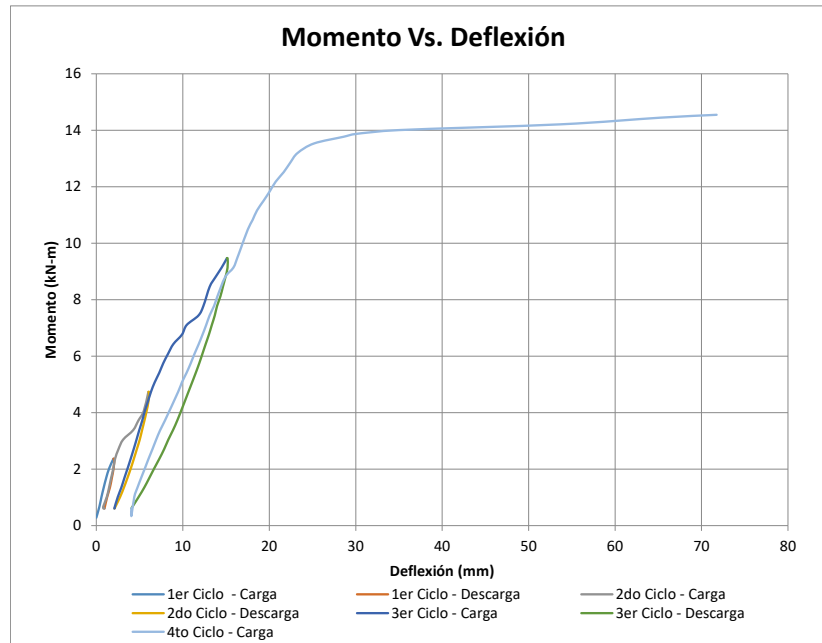
Muro en mampostería de concreto reforzado con barras en acero.

Fecha del ensayo: octubre 19 de 2016



Carga	42.9	kN
Momento	14.5	kN-m
Deflexión	71.7	mm
Deformación Unitaria Refuerzo	0.26	%
Carga de Agrietamiento	6.0	kN

Tabla 22 Valores Máximos Experimentales MT16



Gráfica 25 Deflexión en el Centro Vs. Carga MT16