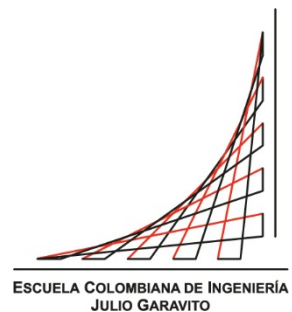


Maestría en Ingeniería Civil

Comportamiento dinámico de muros de mampostería no estructural reforzados mediante polímeros reforzados con fibra de carbono, CFRP

Camilo José Vega Vargas

Bogotá D.C., 19 de Mayo de 2015



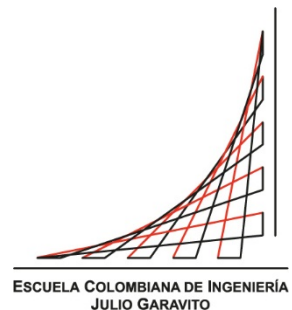
**Comportamiento dinámico de muros de mampostería no
estructural reforzados mediante polímeros reforzados con fibra
de carbono, CFRP**

**Tesis para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con
énfasis en Ingeniería Estructural**

Nancy Torres Castellanos, I.C., M.Sc, Ph.D

Directora:

Bogotá D.C., 19 de Mayo de 2015



La tesis de maestría titulada “Comportamiento dinámico de muros de mampostería no estructural reforzados mediante polímeros reforzados con fibra de carbono, CFRP” presentada por Camilo José vega Vargas, cumple con los requisitos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural.

Nancy Torres Castellanos, M.Sc, Ph.D
Directora de la Tesis

Sandra Jerez Barbosa, M.Sc, Ph.D
Jurado

Gustavo Tumialán, M.Sc, Ph.D
Jurado

Bogotá D.C., 19 de Mayo de 2015

A mi familia.

Agradecimientos

A Dios por todas las oportunidades que me ha dado y permitirme culminar satisfactoriamente este logro en mi formación; a mi familia por el apoyo y la comprensión que siempre me han brindado en cada meta a la que me he propuesto.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería por su apoyo a través de los proyectos de convocatoria interna de investigación en innovación, en especial al personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales, Cristian Cogollo, María Isabel Espejo, Ramón Torres, Jairo Páez y Epifanio Bustos quienes siempre estuvieron prestos a colaborar en cada una de las actividades del proyecto.

A la Ingeniera Nancy Torres por haber depositado su confianza en mí y haber estado siempre apoyándome en el desarrollo de la investigación con su acompañamiento y asesoría; al Ingeniero Pedro Nel Quiroga por brindarme la oportunidad de estar en la Escuela donde pude aprender muchas cosas que mejoraron mi formación.

A la empresa Sika Colombia S.A. por el apoyo brindado al proyecto con la donación de los tejidos de fibra de carbono y resinas epóxicas para su instalación, en especial al Ingeniero Jorge Rendón quien fue el intermediario entre la compañía y el proyecto y siempre nos prestó la asesoría técnica necesaria para llevar el proyecto a buen término.

Al Ingeniero Gustavo Tumialán, miembro del Comité 440 del ACI, por su colaboración y asesoría en el desarrollo de la investigación y por estar siempre dispuesto a solucionar nuestras inquietudes.

A la Ladrillera Prisma S.A. quien también fue patrocinadora del proyecto con la donación de los ladrillos con los cuales fue posible la construcción de los muros.

Resumen

En muchos países predominan las viviendas construidas con muros de mampostería en arcilla no reforzada, dando lugar a edificaciones de baja resistencia y ductilidad, muy vulnerables a eventos sísmicos. Esto ha quedado demostrado con la experiencia de sismos precedentes, donde el comportamiento de las edificaciones con muros no estructurales fue inadecuado debido a su poca capacidad de disipación de energía, produciendo en los muros, grandes fallas que llevaron incluso al colapso de ellas. Investigaciones realizadas demuestran que el uso de reforzamiento de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP por sus siglas en inglés) adheridos a muros de mampostería puede mejorar la capacidad de disipación de energía de los mismos convirtiéndolos en muros resistentes a cargas laterales.

En el presente documento se exponen los resultados de un proyecto de investigación donde se evaluó el comportamiento ante cargas laterales en muros de mampostería no estructural, al ser reforzados mediante CFRP teniendo en cuenta diferentes sistemas de anclaje a la cimentación. En el programa experimental, fueron construidos 14 muros de mampostería de arcilla, a escala real, utilizando bloque No. 5, usado comúnmente en este tipo de edificaciones; 7 de ellos tenían dimensiones de 1,23 m de largo por 1,90 m de alto y 7 de 2,47 m de largo por 1,90 m de alto. Ocho muros fueron ensayados ante carga lateral estática y seis ante carga lateral cíclica en su plano.

Fueron comparadas las respuestas de los muros, en cuanto a comportamiento histerético, carga máxima, ductilidad y degradación de rigidez. Los resultados muestran que el material de refuerzo mejoró significativamente la capacidad de carga última de los muros, se mitigó la falla súbita ya que fueron progresivas y menos frágiles, logrando de esta manera, un mejor nivel de desempeño.

Palabras clave: Mampostería no estructural, polímeros reforzados con fibra, comportamiento dinámico, reforzamiento sísmico.

Abstract

In many countries, buildings are made with unreinforced clay masonry walls, producing constructions with low resistance and ductility, very vulnerable to seismic events. This has been observed in previous earthquakes experiences, where the buildings behavior with non- structural walls was inadequate due to their low ductility and their low capacity of dissipation of energy, producing within them big failures that even made them collapse. Investigations have revealed that the use of reinforced polymers with carbon fiber (CFRP) bonded to masonry walls can increase the walls capacity of dissipation of energy, turning them into more resistant walls to lateral loads.

This document reports the results obtained from a research where the behavior of non-structural masonry walls regarding lateral loads when reinforced CFRP considering different anchoring systems to the foundation was evaluated. In the test program 14 clay masonry walls were built at a normal scale, using brick No. 5, which is the one normally used in this type of buildings. From the 14 walls, half of them were 1,23 meters long by 1,90 meters high and the other half of 2,47 meters long and 1,90 meters high. Eight walls were tested with static lateral load and six were reinforced and tested with cyclical lateral load in its plane.

The answers of the walls were compared regarding the hysteretic behavior, maximum load, ductility and stiffness degradation. The results revealed that the reinforcement material significantly increased the ultimate load capacity, the sudden failure decreased because they were progressive and less fragile, attaining better performance levels of these elements.

Keywords: Non-structural masonry, fiber reinforced polymers, dynamic behavior, seismic retrofitting.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVIII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XIX
Introducción	1
1. Objetivos	7
1.1 General	7
1.2 Específicos.....	7
2. Estado del arte	11
2.1 Comportamiento sísmico de la mampostería no estructural	11
2.2 Reforzamiento de estructuras de mampostería	21
2.2.1 Construcción de elementos de confinamiento	21
2.2.2 Revestimiento estructural en concreto reforzado	22
2.2.3 Mallas de refuerzo recubiertas con mortero	23
2.2.4 Reemplazo de muros no estructurales por muros estructurales	26
2.2.5 Reforzamiento externo con materiales compuestos (FRP).....	27
2.3 Antecedentes de reforzamiento de muros de mampostería con FRP	29
2.3.1 Antecedentes con carga en el plano	30
2.3.2 Antecedentes con carga fuera del plano	46
3. Materiales	51
3.1 Unidades de mampostería	51
3.1.1 Propiedades físicas	51
3.1.2 Propiedades mecánicas	52
3.2 Mortero de pega	54
3.2.1 Propiedades en estado fresco.....	54
3.2.2 Propiedades en estado endurecido.....	55
3.3 Polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP)	55
3.3.1 Propiedades físicas	55
3.3.2 Propiedades mecánicas	56
3.4 Resinas	57
3.5 Mampostería	58
3.5.1 Propiedades mecánicas	58

4. Programa experimental.....	63
4.1 Metodología	63
4.2 Variables del estudio experimental	63
4.3 Caracterización de materiales	64
4.3.1 Mampostería	65
4.3.2 Mortero de pega	67
4.3.3 Tejido de fibra de carbono	68
4.3.4 Concreto.....	69
4.4 Proceso constructivo de los muros	70
4.4.1 Vigas de cimentación	70
4.4.2 Muros no reforzados	72
4.4.3 Vigas de borde superior	75
4.4.4 Muros reforzados	77
4.4.5 Sistemas de anclaje	83
4.5 Ensayos en muros a escala real	98
4.5.1 Descripción de los muros.....	98
4.5.2 Configuraciones de reforzamiento	101
4.5.3 Normas y documentos de referencia	106
4.5.4 Cálculo de la resistencia teórica de los muros de prueba.....	106
4.5.5 Códigos de identificación de especímenes de prueba.....	108
4.5.6 Ensayos monotónicos (Estáticos).....	108
4.5.7 Protocolo de carga	109
4.5.8 Ensayos dinámicos (Cíclicos)	114
5. Resultados y análisis	119
5.1 Resultados caracterización de materiales	119
5.1.1 Mampostería	120
5.1.2 Mortero de pega	122
5.1.3 Tejido de fibra de carbono	125
5.1.4 Concreto.....	125
5.2 Resultados y análisis de los sistemas de anclaje	126
5.3 Resultados y análisis de los ensayos monotónicos.....	130
5.3.1 Capacidad de carga de los muros en los ensayos monotónicos	133
5.4 Resultados y análisis de los ensayos dinámicos (Cíclicos)	135
5.4.1 Modos de falla de los muros	135
5.4.2 Capacidad de carga de los muros en los ensayos cíclicos.....	145
5.4.3 Respuesta histerética.....	148
5.4.4 Degradación de rigidez	153
5.4.5 Ductilidad	155
5.4.6 Deformaciones unitarias en la fibra.....	158
5.4.7 Comparación de resultados experimentales con los obtenidos por diseño según el Documento ACI 440.7R – 10.	160
5.4.8 Ejemplo de diseño.....	162
5.4.9 Análisis de costos	169
6. Conclusiones y recomendaciones.....	173
6.1 Conclusiones	173
6.2 Recomendaciones	175
A. Anexo: Compresión en bloques.....	181

B. Anexo: Absorción en bloques	185
C. Anexo: Compresión en muretes.....	189
D. Anexo: Módulo de elasticidad de la mampostería.....	193
E. Anexo: Compresión en cubos de mortero	197
F. Anexo: Compresión en cilindros de mortero	201
G. Anexo: Compresión en cilindros de concreto	205
H. Anexo: Diseño de muros con FRP	209
I. Anexo: Diseño mezcla de concreto	213
J. Anexo: Diseño mezcla de mortero de pega	217
K. Anexo: Propiedades del tejido de fibra de carbono y adhesivo epóxico	221
Bibliografía	225

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1 Colapso de edificación (Terremoto de Popayán, 1983).....	14
Figura 2-2 Daños en la Catedral Metropolitana (Terremoto de Popayán, 1983).....	14
Figura 2-3 Colapso de una edificación residencial (Terremoto de Popayán, 1983).....	14
Figura 2-4 Colapso de muros (Terremoto de Popayán, 1983).....	15
Figura 2-5 Falla de una edificación de mampostería no estructural en Armenia (Terremoto del Eje Cafetero, 1999).....	16
Figura 2-6 Falla de una iglesia de mampostería no reforzada en Armenia (Terremoto del Eje Cafetero, 1999).....	16
Figura 2-7 Colapso general de viviendas de mampostería no reforzada en Armenia (Terremoto del Eje Cafetero, 1999).	16
Figura 2-8 Fallas en la mampostería no reforzada (Terremoto de Northridge, 1994).....	17
Figura 2-9 Falla por desprendimiento de las unidades de mampostería (Terremoto de Northridge, 1994).....	18
Figura 2-10 Colapso parcial de la mampostería (Terremoto de Northridge, 1994).....	18
Figura 2-11 Caída de muros de fachada (Terremoto de Chile, 2010).	19
Figura 2-12 Grietas diagonales en muros (Terremoto de Chile, 2010).....	19
Figura 2-13 Caída de muro de mampostería en vivienda vecina por falta de confinamiento (Terremoto de Chile, 2010).	20
Figura 2-14 Volcamiento de muro de mampostería (Terremoto de Chile, 2010).....	20
Figura 2-15 Fallas típicas por corte en la mampostería no reforzada (Terremoto de Tecomán, Colima, 2003).....	21
Figura 2-16 Reforzamiento de un muro de mampostería con elementos de confinamiento en concreto reforzado.	22
Figura 2-17 Ensayo de carga lateral monotónica	24
Figura 2-18 Detalle de muro a escala real.	25
Figura 2-19 Modos de falla de la mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano.	31
Figura 2-20 Dimensiones de los especímenes.	34
Figura 2-21 Espécimen de prueba de relación Altura/Longitud mayor que 1, con configuración de reforzamiento en diagonal.	34
Figura 2-22 Espécimen de prueba de relación Altura/Longitud menor que 1, con configuración de reforzamiento completa alrededor de todo el muro.	35
Figura 2-23 Dimensiones de muros y configuraciones de reforzamiento	37
Figura 2-24 Desprendimiento de la fibra de la cara del muro.	38
Figura 2-25 Configuraciones de refuerzo del ensayo de compresión.....	39

Figura 2-26 Configuraciones de refuerzo del ensayo detracción diagonal.	40
Figura 2-27 Montaje del ensayo con configuración de reforzamiento en diagonal.	41
Figura 2-28 Montaje del ensayo de muro reforzado completamente.	42
Figura 2-29 Muro resanado y reforzado con fibra de carbono.	43
Figura 2-30 Espécimen de prueba con refuerzo de fibra de carbono horizontal.	44
Figura 2-31 Montaje de muro a escala real.	45
Figura 2-32 Montaje de la viga de mampostería (Izq.) y espécimen durante la prueba (Der.).....	48
Figura 2-33 Montaje del muro a escala real (Izq.) y espécimen deformado durante la prueba (Der.).....	49
Figura 3-1 Tipos de unidades de mampostería.....	52
Figura 4-1 Dimensiones del bloque No. 5 estándar utilizados.	65
Figura 4-2 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en unidades de mampostería.	65
Figura 4-3 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en muretes.	66
Figura 4-4 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cubos de mortero.	67
Figura 4-5 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de mortero.	68
Figura 4-6 Montaje del ensayo de fluidez en morteros.	68
Figura 4-7 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de concreto.	69
Figura 4-8 Proceso constructivo de las vigas de cimentación.	70
Figura 4-9 Dimensiones y refuerzo de las vigas de cimentación.	71
Figura 4-10 Secuencia del proceso constructivo de los muros no reforzados.	73
Figura 4-11 Muros sin reforzar al finalizar su construcción.	74
Figura 4-12 Proceso constructivo de las vigas de borde superior.	75
Figura 4-13 Dimensiones y refuerzo de las vigas de borde superior.	76
Figura 4-14 Secuencia del proceso constructivo del reforzamiento de los muros.	81
Figura 4-15 Muros reforzados con sistema de anclaje No 1.	82
Figura 4-16 Muros reforzados con sistema de anclaje No 4.	83
Figura 4-17 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.1.	87
Figura 4-18 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.2.	89
Figura 4-19 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.3.	91
Figura 4-20 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.4.	95
Figura 4-21 Dimensiones y refuerzo del sistema de anclaje No. 4.	97
Figura 4-22 Dimensiones y esquema del muro corto.....	99
Figura 4-23 Modelado 3D del muro corto sin reforzamiento.	99
Figura 4-24 Dimensiones y esquema del muro largo.....	100
Figura 4-25 Modelado 3D del muro largo sin reforzamiento.	100
Figura 4-26 Esquemas de reforzamiento en grilla.	102
Figura 4-27 Modelado 3D del reforzamiento en grilla.	103
Figura 4-28 Esquemas de reforzamiento en diagonal.	104
Figura 4-29 Modelado 3D del reforzamiento en diagonal.	105
Figura 4-30 Montaje del ensayo monotónico.	109
Figura 4-31 Historial de carga controlado por la deformación.	110
Figura 4-32 Protocolo de carga.....	113

Figura 4-33 Relación de amplitudes en el historial de carga.	113
Figura 4-34 Montaje del ensayo Dinámico.....	114
Figura 4-35 Detalles del montaje del ensayo Dinámico.....	115
Figura 4-36 Dispositivo de transferencia de carga del actuador a los muros largos.....	116
Figura 4-37 Dispositivo de transferencia de carga del actuador a los muros cortos.....	116
Figura 5-1 Falla de una unidad de mampostería durante el ensayo de resistencia a la compresión	120
Figura 5-2 Falla de un murete durante del ensayo de resistencia a la compresión.....	121
Figura 5-3 Falla de un cubo de mortero durante el ensayo de resistencia a la compresión	122
Figura 5-4 Modos de falla obtenidos en los cubos de mortero en el ensayo de resistencia a la compresión.....	123
Figura 5-5 Falla de un cilindro de mortero durante el ensayo de resistencia a la compresión	123
Figura 5-6 Modos de falla obtenidos en los cilindros de mortero en el ensayo de resistencia a la compresión	124
Figura 5-7 Realización del ensayo de fluidez en morteros	125
Figura 5-8 Fallas de los cilindros de concreto durante el ensayo de resistencia a la compresión	126
Figura 5-9 Falla del sistema de anclaje No. 1.....	127
Figura 5-10 Fallas del sistema de anclaje No. 2.....	128
Figura 5-11 Fallas del sistema de anclaje No. 3.....	129
Figura 5-12 Falla de la fibra en el sistema de anclaje No. 4.....	129
Figura 5-13 a) y b) Modos de falla de los especímenes no reforzados; c) Detalle del desprendimiento de una de las hiladas	130
Figura 5-14 Modos de falla del espécimen R–D–L–4–ES.....	131
Figura 5-15 Montaje del ensayo monotónico del espécimen R–G–C–2–ES.....	132
Figura 5-16 Modos de falla del espécimen R–G–C–2–ES.....	132
Figura 5-17 Carga vs Desplazamiento ensayos monotónicos.....	134
Figura 5-18 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R–D–C–1–DI.....	135
Figura 5-19 Fallas del espécimen R–D–C–1–DI.....	136
Figura 5-20 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R–D–C–2–DI.....	137
Figura 5-21 Fallas del espécimen R–D–C–2–DI.....	138
Figura 5-22 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R–G–C–1–DI.....	139
Figura 5-23 Fallas del espécimen R–G–C–1–DI	140
Figura 5-24 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R–D–L–1–DI.....	140
Figura 5-25 Fallas del espécimen R–D–L–1–DI	141
Figura 5-26 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R–D–L–2–DI.....	142
Figura 5-27 Fallas del espécimen R–D–L–2–DI	143
Figura 5-28 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R–G–L–1–DI.....	144
Figura 5-29 Fallas del espécimen R–G–L–1–DI	145
Figura 5-30 Curvas de histéresis de los muros de prueba	150
Figura 5-31 Envolvente de ciclos de histéresis muros cortos	151
Figura 5-32 Envolvente de ciclos de histéresis muros largos	151

Figura 5-33 Degradación de rigidez muros largos	153
Figura 5-34 Degradación de rigidez muros cortos	154
Figura 5-35 Relación entre ductilidad y factor de reducción de fuerza	156
Figura 5-36 Determinación de Δ_m y Δ_y	157
Figura 5-37 Deformación unitaria en la fibra vs Deriva	159
Figura 5-38 Cálculo de la carga lateral máxima por flexión debida al acero en los anclajes	161
Figura 5-39 Planta arquitectónica de la distribución de muros en una vivienda típica...	162
Figura 5-40 Fuerzas Cortantes en los muros del piso 1 para sismo en X y Y	165
Figura 5-41 Fuerzas Cortantes en los muros del piso 2 para sismo en X y Y	167

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1 Valores mínimos de resistencia a la compresión, f_{cu} para las unidades de mampostería.....	53
Tabla 3-2 Valores máximos de absorción para las unidades de mampostería.....	53
Tabla 3-3 Clasificación de morteros de pega por propiedad o proporción.....	54
Tabla 4-1 Variables del estudio experimental	64
Tabla 4-2 Resumen de ensayos en materiales individuales	64
Tabla 4-3 Normas y documentos de referencia	106
Tabla 4-4 Códigos de identificación para los especímenes de prueba	108
Tabla 4-5 Valores del protocolo de carga.....	111
Tabla 5-1 Cargas máximas obtenidas en los ensayos monotónicos	133
Tabla 5-2 Cargas y fallas obtenidos en los ensayos dinámicos.....	146
Tabla 5-3 Relación entre carga máxima y área de refuerzo	147
Tabla 5-4 Valores de degradación de rigidez en los muros largos	154
Tabla 5-5 Valores de degradación de rigidez en los muros cortos	155
Tabla 5-6 Cálculo de R_0	158
Tabla 5-7 Comparación de resultados experimentales y teóricos.....	160
Tabla 5-8 Fuerza horizontal equivalente para el ejercicio de aplicación	163
Tabla 5-9 Fuerzas finales en los muros seleccionados.....	167
Tabla 5-10 Valores de diseño para el Muro 10	168
Tabla 5-11 Precios unitarios de un muro del proyecto reforzado con CFRP	169
Tabla 5-12 Precios unitarios de un muro existente reforzado con CFRP	170
Tabla 5-13 Resumen de costos de muros existentes y nuevos (proyecto) reforzados con CFRP	170

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
a	Profundidad del rectángulo de compresiones	m
a_i	Amplitud de los ciclos en el historial de carga	m
a_n	Amplitud máxima de los ciclos en el historial de carga	m
c	Profundidad del eje neutro	m
d_i	Distancia de la fibra de FRP a la fibra extrema en compresión	m
d_v	Profundidad efectiva de la mampostería para los cálculos de cortante	m
e_x	Excentricidad en x	m
e_y	Excentricidad en y	m
f'_{cu}	Resistencia a compresión de la unidad de mampostería	MPa
f'_c	Resistencia a compresión del concreto	MPa
f'_{cp}	Resistencia a compresión del mortero de pega	MPa
f'_m	Resistencia a compresión de la mampostería	MPa
f_{fe}	Resistencia efectiva a tensión de la fibra curada	MPa
f_{fu}	Resistencia última a tensión de la fibra curada	MPa
f_{fu}^*	Resistencia última a tensión de la fibra curada reportada por el fabricante	MPa
h	Altura de la unidad de mampostería	mm
h	Altura de un elemento	m
h_p	Altura de piso	m
k	Exponente relacionado con el período fundamental de la edificación	
k_p	Factor de corrección por absorción de la unidad. 0.8 para unidad de arcilla; 1.4 para unidad de concreto.	
l_d	Longitud de desarrollo	m
n	Número de capas de FRP para reforzamiento en corte	
s	Separación centro a centro del FRP	m
t	Espesor del muro	m
t_f	Espesor de la fibra curada	m
w_f	Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en corte	m

Símbolo	Término	Unidad SI
A_a	Aceleración horizontal pico efectiva para diseño	
A_f	Área total de la sección transversal de FRP	m ²
C_E	Coefficiente de reducción ambiental (Tabla 8.1 Guía ACI 440.7R - 10)	
C_{vx}	Porcentaje del cortante sísmico que le corresponde a cada piso.	
E_f	Módulo de elasticidad de la fibra curada	MPa
E_m	Módulo de elasticidad de la mampostería	MPa
G_m	Módulo de cortante de la mampostería	MPa
F_a	Coefficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos	
F_{fi}	Fuerzas en las fibras de FRP	N
F_p	Fuerza sísmica horizontal que le corresponde a cada piso	N
FS	Factor de seguridad	
H	Altura del muro	M
I	Coefficiente de importancia	
K	Rigidez del muro	N/m
K_v	Coefficiente de falla por corte	
K_m	Coefficiente de falla por flexión	
L	Longitud del muro	M
M_n	Momento nominal de diseño	N·m
M_T	Momento de torsión	N·m
N	Número de bandas de FRP para reforzamiento	
S_a	Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad	
P_{fv}	Fuerza por unidad de ancho en el FRP	N/m
R	Coefficiente de capacidad de disipación de energía	
R_0	Coefficiente básico de capacidad de disipación de energía	
T	Período de vibración del sistema elástico	s
V_b	Cortante sísmico en la base	N
V_p	Cortante sísmico que le corresponde a cada piso	N
V_i	Cortante en cada muro debido al momento de torsión	N
V_f	Resistencia al corte proporcionada por el FRP	N
$V_{n,s}$	Resistencia nominal al corte del muro reforzado con FRP	N
V_n^{URM}	Resistencia nominal al corte del muro sin refuerzo	N
V_{bjs}	Resistencia al deslizamiento de la junta	N
V_{dt}	Resistencia a tensión diagonal	N
V_{tc}	Resistencia al aplastamiento en la base	N
W	Peso de la edificación	N
X_{CM}	Coordenada x del centro de masas de la edificación	m
X_{CR}	Coordenada x del centro de rigidez de la edificación	m
Y_{CM}	Coordenada y del centro de masas de la edificación	m
Y_{CR}	Coordenada y del centro de rigidez de la edificación	m

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI
β_1	Relación entre la profundidad del rectángulo de compresiones y el eje neutro	
γ_{Mamp}	Peso específico de la mampostería	kN/m ³
γ_{Conc}	Peso específico del concreto	kN/m ³
ϵ_{mu}	Deformación unitaria máxima de la mampostería	mm/mm
ϵ_{fu}^*	Elongación de rotura de la fibra curada reportada por el fabricante	mm/mm
ϵ_{fu}	Elongación de rotura de la fibra curada	mm/mm
ϵ_{fe}	Elongación de rotura efectiva de la fibra curada	mm/mm
θ	Ángulo de colocación del FRP respecto a la horizontal	°
μ	Relación de Poisson	
μ	Ductilidad	
\emptyset	Coefficiente de reducción de resistencia	
ω_f	Índice de refuerzo del FRP	
Δ_m	Deformación máxima producida en un espécimen de ensayo	m
Δ_m	Amplitud de deformación máxima del historial de carga	m
Δ_y	Deformación de fluencia producida en un espécimen de ensayo	m
Δ_0	Amplitud de deformación más pequeña del historial de carga	m

Abreviaturas

Abreviatura	Término
FRP	Fiber Reinforced Polymer
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Polymer
NTC	Norma Técnica Colombiana
NSR	Reglamento colombiano de construcción sismo resistente
ACI	American Concrete Institute
URM	Unreinforced Masonry
NSM	Near Surface Mounted
MME	Mortero y Malla Electrosoldada
FEMA	Federal Emergency Management Agency
LVDT	Linear Variable Differential Transformer

Introducción

“El 87% de la población en Colombia habita en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta” (NSR-10, pp. i, Tomo 1). A pesar de que desde 1984 se cuenta con un Reglamento de Construcción Sismo Resistente, hoy en día NSR-10, sólo en Bogotá, de acuerdo con informes técnicos realizados por el Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos Naturales de la Universidad de los Andes, cerca del 65% de la población, viven en edificaciones vulnerables a movimientos telúricos (Uniandes, 2005). El crecimiento en la ciudad de Bogotá en los últimos años (de 1984 hacia adelante) ha sido muy grande y aunque se esperaría que esas nuevas viviendas estuvieran construidas siguiendo las especificaciones de sismo resistencias establecidas, al menos en el código de 1984, mencionado anteriormente, esto no ha sido posible, debido principalmente a la falta de planeación en urbanismo de la ciudad sumado a informalidad de la mano de obra no calificada. Estudios realizados por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica indican que un 80% de las edificaciones de Bogotá fueron construidas sin atender ninguna norma sísmica, lo cual no quiere decir que ante un fenómeno telúrico todas estas edificaciones vayan a colapsar, pero si es un indicativo de la alta vulnerabilidad a la falla en la que se encuentran (Riveros, 2009). Si la anterior situación se presenta en Bogotá, que siendo la capital del país se espera que haya un mayor control por parte de las diferentes instituciones relacionadas con la construcción, es posible inferir que este panorama también se evidencia en todo el territorio nacional.

En Colombia y Latinoamérica predominan las viviendas construidas con muros de mampostería en arcilla no reforzada, dando lugar a edificaciones de baja resistencia y ductilidad, muy vulnerables a sismos. Esto ha quedado demostrado con la experiencia de sismos precedentes, como el del eje cafetero en 1999, o el de Popayán en 1983 donde el comportamiento de las edificaciones con muros no estructurales fue inadecuado debido a su baja ductilidad y poca capacidad de disipación de energía, produciendo en ellos grandes fallas que llevaron incluso al colapso total. Si a esto se suma que este tipo de viviendas,

en su mayoría son construidas sin una supervisión técnica adecuada y se encuentran ubicadas en zonas geológicas con un grado de amenaza sísmica considerable, las posibilidades de presentarse fallas son aún mayores.

Conscientes de esta problemática, y dado el gran impacto que se podría generar tanto en términos económicos como de pérdida de vidas humanas si ocurriera un evento sísmico considerable, es importante desarrollar investigaciones que mitiguen la falla súbita de los muros no estructurales y busquen una solución para que estos elementos, que serían los más afectados ante un fenómeno telúrico, puedan desarrollar mejores niveles de desempeño y sirvan a su vez como sistema de resistencia sísmica para aquellas edificaciones que no lo tengan bien definido o como un componente adicional para las que lo tienen pero presentan deficiencias en su diseño o construcción. Así, se busca reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas, y defender en lo posible el patrimonio.

Entre las investigaciones con las que se puede mitigar esta problemática está el desarrollo de soluciones de reforzamiento que apunten a optimizar el comportamiento de las edificaciones vulnerables. El presente trabajo de investigación, busca evaluar el comportamiento que existe en muros de mampostería de arcilla no estructurales al ser reforzados mediante polímeros reforzados con fibra de carbono, cuando se vean sometidos a cargas laterales dinámicas en su plano.

Investigaciones en el mundo y en Colombia demuestran que el uso de reforzamiento de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) adheridos a muros de mampostería puede mejorar la capacidad de disipación de energía de los mismos convirtiéndolos en muros resistentes a cargas laterales (Tumialan et al., 2009). Este sistema de reforzamiento tendría algunas ventajas respecto a sistemas tradicionales pues requieren menos demoliciones, sería una técnica no invasiva y como resultado habría menor producción de polvo, ruido y escombros. Otros autores también afirman que el reforzamiento de muros de mampostería con compuestos de FRP produce un aumento de la rigidez lateral de los muros y les permiten una mayor deformación en comparación con los muros no reforzados mejorando así su capacidad a flexión y ductilidad (Elgawady et al., 2006).

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR – 10, reconoce la mampostería reforzada exteriormente, normalmente con mallas electrosoldadas dentro de una capa de revoque (pañete) el cual se fija a los muros mediante conectores y clavos, como un tipo de mampostería estructural. Como alternativa al material de refuerzo

convencional y el pañete, en este proyecto se buscó estudiar el comportamiento de polímeros reforzados con fibra de carbono y de esta manera hacer un aporte a la reglamentación, incluyendo un respectivo análisis de costos.

La metodología que se utilizó para llevar a cabo el presente proyecto de investigación se compone de dos partes: la primera consistió en una búsqueda bibliográfica y la segunda en la realización de un programa experimental. El documento se compone de 6 capítulos.

En el capítulo 1 se plantea el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación que permitió llevar a buen término el desarrollo de cada una de las variables planteadas.

En el capítulo 2 se presentan los principales aportes realizados por diferentes autores en lo relacionado con el comportamiento de muros de mampostería no estructural reforzados con FRP cuando son sometidos a cargas laterales en el plano. Inicia describiendo el desempeño sísmico de la mampostería no estructural haciendo énfasis en unos eventos telúricos ocurridos. Posteriormente, continúa con los diferentes métodos de reforzamiento que existen para reforzar estructuras de mampostería, haciendo hincapié en los materiales compuestos y finaliza con los aportes que han hecho diferentes autores en investigaciones relacionadas con el tema en estudio.

Con el desarrollo del estado del arte, posteriormente en el capítulo 3 se presenta una descripción de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que se utilizaron en la presente investigación. Estos incluyen las unidades de mampostería, el mortero de pega y los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) con sus respectivas resinas epóxicas para su instalación.

La segunda parte del proyecto compuesta por el programa experimental se plasma en el capítulo 4. Aquí se presentan las variables del estudio experimental y una caracterización individual de los materiales usados en proyecto, se describe la construcción de los especímenes de prueba a escala real utilizando el bloque tradicional No. 5., el cual es muy común en el medio colombiano y se plantean las configuraciones de reforzamiento utilizadas en la investigación. Los muros se ensayaron ante carga lateral dinámica en su plano; primero se realizaron ensayos estáticos (monotónicos) a partir de los cuales se pudo establecer el protocolo de carga para realizar el posterior ensayo dinámico con la ayuda de un actuador dinámico.

Los resultados obtenidos del programa experimental se analizan en el capítulo 5. Inicialmente se muestra el resultado de la caracterización de los materiales individuales, luego se presenta el resultado de los ensayos estáticos y dinámicos de cada uno de los especímenes de prueba junto con las curvas de histéresis (para ensayos dinámicos) a partir de los desplazamientos medidos en el plano y de las lecturas de carga reportadas por el actuador dinámico. Con estas curvas se calculó el nivel de ductilidad alcanzado y los valores máximos de la capacidad resistente de los especímenes ante la sollicitación estudiada, se generaron gráficas de degradación de rigidez lateral para evaluar el comportamiento de los muros a medida que avanzan los ciclos de carga y se determinó el estado de esfuerzos en la falla al aplicar la carga lateral máxima. Adicionalmente, se realizó una comparación entre los resultados de resistencia obtenidos en los especímenes de prueba y las cargas laterales a las que estarían sometidos los muros de una vivienda típica en un evento sísmico. Finalmente, el capítulo 5 muestra un análisis de costos de este sistema de reforzamiento externo y lo compara con el tradicional reconocido por el NSR – 10.

Por último, el capítulo 6 presenta las conclusiones obtenidas del desarrollo de la investigación y se plantean recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con el tema en estudio así como la bibliografía utilizada.

1. Objetivos

En el capítulo 1 se plantea el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación que permitieron llevar a buen término el desarrollo de cada una de las variables que se querían estudiar.

1.1 General

Evaluar el comportamiento ante cargas cíclicas en el plano de muros de mampostería no estructural con dos relaciones altura/longitud reforzados externamente mediante polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP).

1.2 Específicos

- Elaborar el estado del arte relacionado con el comportamiento de muros de mampostería no estructural reforzados mediante polímeros reforzados con fibra de carbono.
- Realizar ensayos sobre especímenes de prueba, con diferentes configuraciones de reforzamiento, para evaluar las propiedades de los muros ante cargas cíclicas en el plano.
- Evaluar los diferentes niveles de capacidad, ductilidad y modos de falla de los especímenes ensayados.
- Realizar un análisis comparativo de los resultados experimentales obtenidos en el proyecto con los resultados teóricos planteados por la guía de diseño ACI 440.7R- 10.

8 Comportamiento dinámico de muros de mampostería no estructural reforzados mediante polímeros reforzados con fibra de carbono, CFRP

- Realizar un análisis de costos de este sistema de reforzamiento y compararlo con uno de los sistemas de reforzamiento aceptados por el reglamento NSR – 10.

2.Estado del arte

En el capítulo 2 se presentan los principales aportes realizados por diferentes autores en Colombia, Latinoamérica, Estados Unidos y Europa, en lo relacionado con el comportamiento de muros de mampostería no estructural reforzados con polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) cuando son sometidos a cargas cíclicas dinámicas. Se inicia describiendo el desempeño sísmico de la mampostería no estructural haciendo énfasis en unos estudios de caso. Posteriormente, continúa con los diferentes métodos para reforzar estructuras de mampostería, haciendo hincapié en los materiales compuestos y finaliza, como se mencionó inicialmente, con las contribuciones al tema en estudio que han hecho varios autores en distintas investigaciones.

2.1 Comportamiento sísmico de la mampostería no estructural

La mampostería es un término genérico utilizado para describir un tipo de construcción donde unidades de arcilla, de concreto, o piedras naturales se unen entre sí para formar una estructura de soporte de carga (ACI 440.7R – 10, p. 2). Cuando se habla de mampostería no estructural, (URM por sus siglas en inglés) se hace referencia a aquellas estructuras que tienen este tipo de construcción y no cuentan con ningún material de refuerzo, o si lo tienen, no cumplen con las cantidades mínimas estipuladas en los reglamentos de diseño (Á. San Bartolomé, 1994, p. 6).

La ausencia de este material de refuerzo hace que este tipo de edificaciones tengan una baja ductilidad, poca capacidad de disipación de energía y por consiguiente una baja resistencia; por esta razón, cuando estas estructuras se ven sometidas a eventos sísmicos,

su comportamiento no es el más adecuado; si a esto se le suma que en su mayoría son construidas sin una supervisión técnica adecuada, esto las hace aún más vulnerables a este tipo de eventos incrementando las posibilidades de falla.

San Bartolomé (1994, pp. 41-45) reconoce los siguientes tipos de fallas típicas que presentan las edificaciones de mampostería no estructural cuando se ven sometidas a eventos sísmicos:

- Deslizamiento entre la losa superior (techo) y la junta de construcción que forma la última hilada del muro. Esto se debe a que no existe un refuerzo vertical que sirva de amarre entre la losa superior y el muro y permita la transferencia de esfuerzos entre estos dos elementos (losa – muro).
- Caída de muros perimetrales por la acción de la fuerza sísmica que actúa perpendicular al plano del muro. Esto se debe a la débil unión que existe con los muros transversales debido a la ausencia de algún elemento de confinamiento o de refuerzo horizontal que permita tomar los esfuerzos de tracción que se producen en esos puntos.
- Agrietamiento diagonal de los muros debido a que se supera la resistencia al corte de los mismos. Esto se debe a una inadecuada distribución de los muros en las dos direcciones principales y a la falta de refuerzo horizontal que permita tomar los esfuerzos por corte.
- Fallas localizadas en las aberturas de las ventanas como consecuencia del cambio en la sección del muro y la falta de continuidad del mismo.
- Caída de parapetos y tabiques no arriostrados debido a la acción de la fuerza sísmica perpendicular a su plano.
- Daños por punzonamiento en los muros que sirven como descansos de escaleras. Estas fallas se producen por los empujes de las escaleras sobre estos muros.
- La falta de una separación adecuada entre edificaciones vecinas hace que se produzcan transferencias de cargas y esfuerzos entre ellas que no fueron contempladas durante el diseño.
- Problemas de esbeltez debido a la excesiva altura de los muros, generando fallas por corte y pandeo.
- Falta de continuidad vertical en los muros produciendo que no haya una adecuada transferencia de las solicitaciones de los pisos superiores a los inferiores.

- Discontinuidad en los dinteles de los vanos de puertas y ventanas generando concentración de esfuerzos en los extremos de los dinteles.
- Distribución inadecuada del número de muros en las dos direcciones principales en planta de la edificación generando problemas de torsión.
- Asentamientos diferenciales debido a la presencia de suelos susceptibles a cambios en su configuración debido a la acción sísmica. La fragilidad de la mampostería hace que se produzcan grietas que conlleven a la falla del sistema.

A continuación se presentan unos estudios de caso del comportamiento de la mampostería no estructural frente a eventos sísmicos. Los casos que se mencionan a continuación corresponden a los efectos causados por cinco (5) eventos sísmicos, dos (2) de ellos ocurridos en Colombia y los otros tres (3) ocurridos en otros países.

- *Terremoto de Popayán, Colombia (1983)*

El jueves 31 de marzo de 1983, a las 8:12 de la mañana hora local, un sismo de magnitud 5.6° en la escala de Richter afectó al departamento del Cauca, principalmente las poblaciones de Cajete, Cajibío, Julumito, Popayán y Timbío. Su epicentro fue localizado a 46 kilómetros al suroeste, con una profundidad de 12 km y una duración de 18 s. Las cifras aproximadas sobre lo ocurrido en el Cauca dan cuenta de 250 muertos y 1.500 heridos, 4.964 construcciones destruidas y 13.796 viviendas con daños muy graves (Servicio Geológico Colombiano, SGC).

Las edificaciones de mampostería sufrieron grandes daños debidos principalmente a que no tenían ninguna previsión de sismorresistencia presentándose colapso en la mayoría de las mismas. Entre las fallas que se presentaron se destacan las grietas de cortante en los muros, la caída de culatas, inestabilidad en los muros, grietas por asentamientos en la cimentación, entre otras. La falta de una traba apropiada entre las unidades de los muros que se unían entre sí también propició las fallas (Ingeominas, 1986, p. 182).

De la Figura 2-1 a la Figura 2-4 se muestra el estado en que quedaron algunas edificaciones después de ocurrido el evento sísmico de la ciudad de Popayán.



Figura 2-1 Colapso de edificación (Terremoto de Popayán, 1983)

El primer piso del edificio de la izquierda quedó sepultado por el peso de los pisos superiores

Fuente: Tomado de <http://elpayanes.wordpress.com> Consultado: 24/Feb./2014



Figura 2-2 Daños en la Catedral Metropolitana (Terremoto de Popayán, 1983)

Fuente: Tomado de <http://elpayanes.wordpress.com> Consultado: 24/Feb./2014



Figura 2-3 Colapso de una edificación residencial (Terremoto de Popayán, 1983)

Fuente: Tomado de <http://eluniversal.com> Consultado: 24/Feb./2014



Figura 2-4 Colapso de muros (Terremoto de Popayán, 1983)

Fuente: Tomado de <http://eluniversal.com> Consultado: 24/Feb./2014

- *Terremoto del Eje Cafetero, Colombia (1999)*

El lunes 25 de enero de 1999, a la 1:19 de la tarde hora local, un sismo de magnitud 6,1° en la escala de Richter afectó la zona del eje cafetero, causando grandes daños a las poblaciones de esta región del país, especialmente a la ciudad de Armenia. La profundidad registrada del evento fue de 17 km; la cifra total de muertos se calculó en 1.171, hubo 4.765 heridos, 45.019 viviendas afectadas, 6.408 fincas cafeteras con daños y pérdidas por valor superior a 2.000 millones de dólares (Servicio Geológico Colombiano, SGC).

Al igual que en el terremoto de Popayán, las edificaciones de mampostería carentes de algún material de refuerzo sufrieron grandes daños, la mayoría de las construcciones en mampostería colapsaron presentando fallas de cizallamiento en los muros produciendo grandes grietas diagonales en los mismos; la caída de muros de fachada y perimetrales también fue predominante en el comportamiento de estas edificaciones (Ingeominas, 1999, p. 32).

De la Figura 2-5 a la Figura 2-7 se muestra el estado en que quedaron algunas edificaciones después de ocurrido el evento sísmico en la ciudad de Armenia.



Figura 2-5 Falla de una edificación de mampostería no estructural en Armenia (Terremoto del Eje Cafetero, 1999)

Fuente: Tomado del Informe Técnico “Terremoto del Quindío” (INGEOMINAS)

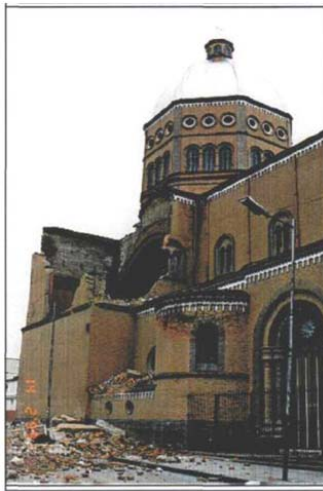


Figura 2-6 Falla de una iglesia de mampostería no reforzada en Armenia (Terremoto del Eje Cafetero, 1999)

Fuente: Tomado del Informe Técnico “Terremoto del Quindío” (INGEOMINAS)

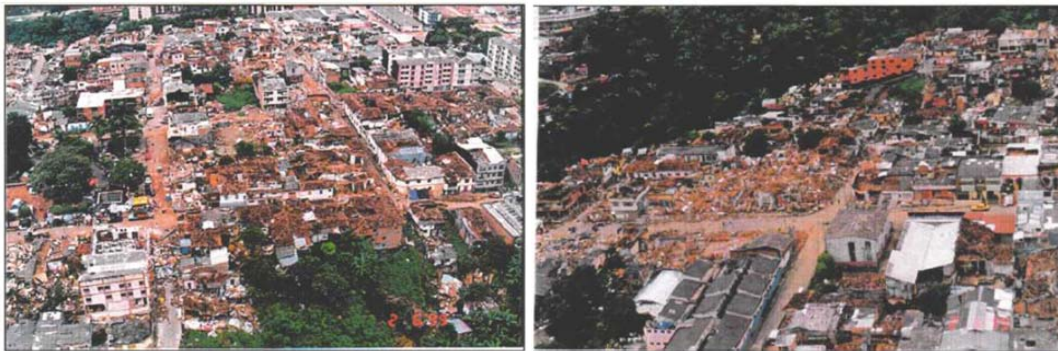


Figura 2-7 Colapso general de viviendas de mampostería no reforzada en Armenia (Terremoto del Eje Cafetero, 1999).

Fuente: Tomado del Informe Técnico “Terremoto del Quindío” (INGEOMINAS)

- *Terremoto de Northridge, US (1994)*

El terremoto de Northridge sacudió la región del valle de San Fernando, a unos 30 kilómetros al noroeste del centro de Los Ángeles, a las 4:31 de la mañana hora local en la mañana del lunes 17 enero de 1994. Al principal acontecimiento le fue asignada una magnitud de 6,7° en la escala de Richter, en la estación de sismógrafos de la Universidad de California en Berkeley. El terremoto de Northridge fue responsable de más de 50 muertes y al menos 5.000 heridos, más de 10.000 edificios quedaron con entrada prohibida o restringida y más de 25.000 unidades de vivienda fueron desocupadas (Klingner, 2006, p. 210).

La mayoría de los edificios con mampostería no reforzada sufrieron daños importantes, tales como el colapso total, caída de muros y parapetos, y grandes grietas diagonales. En el edificio de la Figura 2-8 se observan los daños causados en el segundo nivel debido a la falta de refuerzo en la mampostería; en la Figura 2-9 también se aprecia el desprendimiento de las unidades de mampostería, finalmente, en la Figura 2-10 se muestra el colapso parcial de una edificación.



Figura 2-8 Fallas en la mampostería no reforzada (Terremoto de Northridge, 1994)

Fuente: Tomado de Klingner, 2006, p. 214.



Figura 2-9 Falla por desprendimiento de las unidades de mampostería (Terremoto de Northridge, 1994)

Fuente: Tomado de Klingner, 2006, p. 214.



Figura 2-10 Colapso parcial de la mampostería (Terremoto de Northridge, 1994)

Fuente: Tomado de Klingner, 2006, p. 214.

- *Terremoto de Chile (2010)*

El 27 de febrero a las 3:34 am, hora local, la región central – costera de Chile fue sacudida por un fuerte terremoto, de magnitud 8,8° en la escala de Richter; el epicentro se ubicó en el mar frente a las localidades de Curanipe y Cobquecura aproximadamente a 150 kilómetros al noroeste de Concepción, las consecuencias de este terremoto fueron devastadoras, se han registrado un total de 521 fallecidos y 56 desaparecidos, cerca de 370 mil viviendas presentaron daños y se estimó un total de 12.8 millones de afectados de los cuales 2 millones son damnificados. El sismo fue considerado como el segundo más

fuerte en la historia del país (sólo es superado por el de Valdivia, 1960) y uno de los cinco más fuertes registrados por la humanidad (FOPAE, 2010, p. 3).

El mismo informe hace referencia a las patologías presentadas en las estructuras afectadas por el evento; en lo que respecta a la mampostería no reforzada, se encontraron muros destrozados en su parte superior e inferior debido a la debilidad del muro con respecto a la placa, fallas por corte en los muros produciendo grietas diagonales, colapso de muros perimetrales, daños severos en muros interiores, colapso de fachadas de vivienda, volcamiento de muros de mampostería, fisuramiento en muros de mampostería y caída de muros de mampostería en viviendas vecinas por falta de confinamiento. De la Figura 2-11 a la Figura 2-14 se muestran algunas de las fallas mencionadas anteriormente.



Figura 2-11 Caída de muros de fachada (Terremoto de Chile, 2010).

Fuente: Tomado de Informe Técnico FOPAE. p. 53. Fotografía tomada por el Ing. Fernando A. Ospina del FOPAE.



Figura 2-12 Grietas diagonales en muros (Terremoto de Chile, 2010).

Fuente: Tomado de Informe Técnico FOPAE. p. 53. Fotografía tomada por el Ing. Fredy Vanegas del FOPAE.



Figura 2-13 Caída de muro de mampostería en vivienda vecina por falta de confinamiento (Terremoto de Chile, 2010).

Fuente: Tomado de Informe Técnico FOPAE. p. 53. Fotografía tomada por el Ing. Fernando A. Ospina del FOPAE.



Figura 2-14 Volcamiento de muro de mampostería (Terremoto de Chile, 2010).

Fuente: Tomado de Informe Técnico FOPAE. p. 52. Fotografía tomada por el Ing. Fredy Vanegas del FOPAE.

▪ *Terremoto de Tecomán, Colima, México (2003)*

El martes 21 de enero a las 8:06 de la noche, hora local, la región costera de México cerca de Manzanillo fue sacudida por un fuerte terremoto, de magnitud 7,8° en la escala de Richter; los efectos del terremoto fueron significativos, incluyendo 17 muertos confirmados, más de 500 heridos y alrededor de 15.000 estructuras con algún grado de daño (incluyendo casi 3.000 que fueron completamente destruidas). El comportamiento de la mampostería no reforzada no fue el más adecuado. La Figura 2-15 muestra las fallas por corte de la mampostería que produjo grandes grietas diagonales en los muros de las edificaciones,

los muros fallaron fuera del plano debido a la falta de conexión mecánica entre la parte superior del muro y el techo; a pesar del aumento de la rigidez en el plano producida por el revestimiento de revoque sobre los muros, la falta de refuerzo hizo que este también fallara llegando incluso al colapso de algunas estructuras (Klingner, 2006, pp. 214-215).

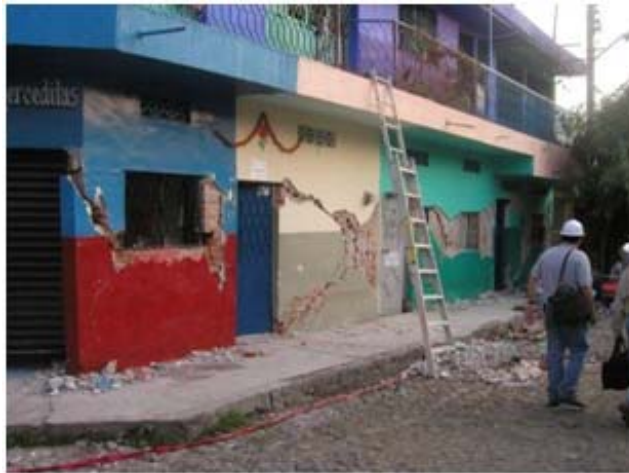


Figura 2-15 Fallas típicas por corte en la mampostería no reforzada (Terremoto de Tecomán, Colima, 2003)

Fuente: Tomado de Klingner, 2006, p. 216.

2.2 Reforzamiento de estructuras de mampostería

Conociendo el inadecuado comportamiento de las estructuras de mampostería no reforzada frente a eventos telúricos, se han propuesto diferentes técnicas de reforzamiento para este tipo de estructuras que mejoran el desempeño frente a esta sollicitación. A continuación se presenta una descripción de las técnicas más comunes y utilizadas, así como las menos comunes, pero que se encaminan hoy en día a ser una alternativa de reforzamiento.

2.2.1 Construcción de elementos de confinamiento

La construcción de elementos de confinamiento consiste en construir elementos en concreto reforzado tales como vigas y columnas alrededor del muro de mampostería confinándolo (NSR-10, pp. D-5, Tomo 2). Para su ejecución se debe quitar la parte del muro donde se desean colocar las nuevas columnas y/o vigas de confinamiento, se procede a colocar el acero de refuerzo verificándose la disposición del mismo, luego se colocan las formaletas y se funde el elemento en concreto teniendo cuidado de realizar el

vibrado para evitar la aparición de hormigueros; es importante que estos elementos de confinamiento también se hagan en las aberturas de los muros (vanos de puertas y ventanas) para mejorar el desempeño de los mismos (Manual AIS, pp. 4-37). La Figura 2-16 muestra un esquema de reforzamiento de este tipo en un muro de mampostería.

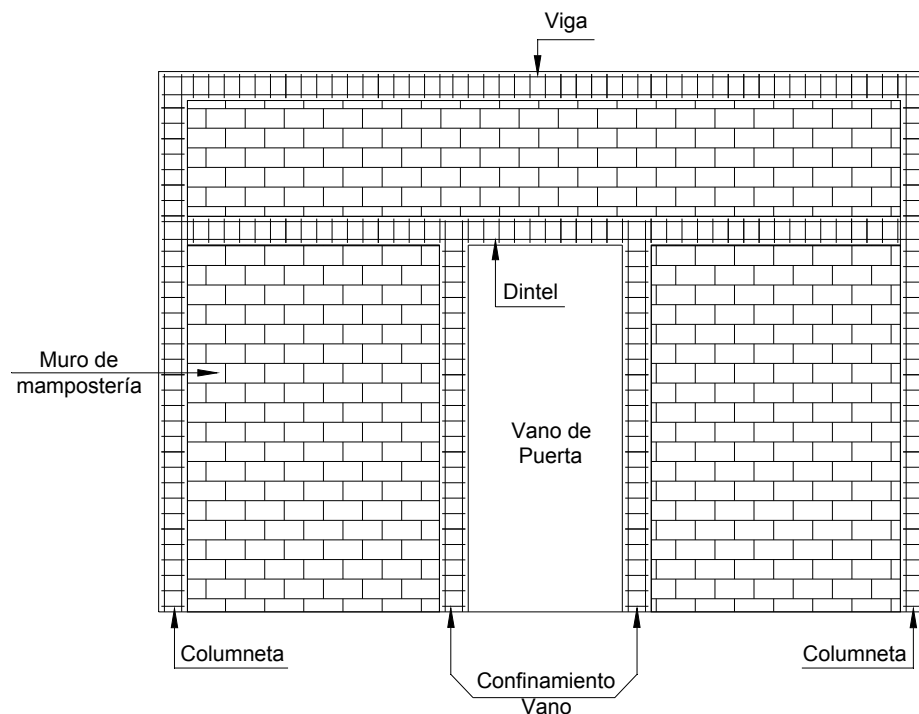


Figura 2-16 Reforzamiento de un muro de mampostería con elementos de confinamiento en concreto reforzado.

Fuente: El autor.

2.2.2 Revestimiento estructural en concreto reforzado

El revestimiento estructural en concreto reforzado, consiste en la colocación de una capa de concreto, con su respectivo refuerzo, en la parte exterior de los muros de mampostería; la colocación del concreto se puede hacer mediante la técnica de concreto lanzado, a través de capas moldeadas sobre una o ambas caras del muro, para garantizar el monolitismo del sistema el refuerzo debe estar unido mediante conexiones con el muro; en la técnica del concreto lanzado se puede usar el proceso de mezcla húmeda o mezcla seca; en la primera se premezclan antes los materiales y se llevan a la boquilla para luego

ser lanzados al muro, y en la segunda el cemento seco y el agregado se llevan a la boquilla donde se mezclan con agua y se lanzan al muro (Manual AIS, pp. 4-38).

Las barras de refuerzo utilizadas deben ser pequeñas (diámetro menor de 5/8”), incluso se recomienda usar hasta 3/8”, los traslapos de las barras se deben alternar para evitar que todos queden a la misma altura; es importante garantizar que todas las barras queden totalmente embebidas dentro de la capa de concreto, razón por la cual se debe hacer una inspección técnica adecuada del proceso constructivo.

2.2.3 Mallas de refuerzo recubiertas con mortero

Las mallas de refuerzo recubiertas con mortero es la construcción de mampostería en donde el refuerzo se coloca dentro de una capa de revoque (pañete) fijándolo al muro de mampostería mediante conectores y/o clavos (NSR-10, pp. D-5, Tomo 2). Esta técnica de reforzamiento de muros de mampostería es similar a la del revestimiento estructural en concreto reforzado; la variante en este caso, es que el material de refuerzo está constituido por una malla, que puede ser de acero electrosoldada, de tela o de materiales compuestos, y el material de revestimiento en este caso pasa a ser un mortero. Se recomienda realizar el reforzamiento en ambas caras de los muros y su fijación se puede realizar mediante conectores o clavos de acero instalados mediante diferentes procedimientos, la técnica tiene la ventaja de que no requiere mano de obra altamente especializada y los materiales a emplear son de bajo costo (S. López, 2013, p. 15).

Se han realizado varias investigaciones sobre el comportamiento de muros de mampostería reforzados externamente con mallas. A continuación se mencionan algunos aportes al respecto.

S. M. Alcocer et al. (1996), realizaron ensayos en muros de mampostería confinada reforzada externamente con malla electrosoldada y mortero; los muros se sometieron a cargas laterales dinámicas en el plano y perpendicular a él, bajo carga axial constante. Las variables más importantes que se tuvieron en cuenta en este estudio fueron el diámetro de las mallas de refuerzo y el sistema de anclaje; los resultados de este estudio demostraron que este tipo de reforzamiento incrementa la capacidad de deformación en hasta dos veces respecto a los especímenes no reforzados; los autores recomiendan derivas de diseño superiores al 0.5% para este tipo de muros, los patrones de fisuración observados en los

especímenes reforzados son uniformes y la capacidad de disipación de energía es mayor que la de los no reforzados.

De otro lado, en la Escuela Colombiana de Ingeniería se han realizado pruebas de carga lateral dinámica sobre muros de mampostería reforzada externamente con malla electrosoldada y mortero para estudiar su comportamiento. S. López (2013), realizó ensayos de carga lateral monotónica y dinámica en el plano en muros de tamaño real para evaluar su rigidez, resistencia y capacidad de disipación de energía. Se ensayaron especímenes de muros, representativos de las edificaciones residenciales típicas que se encuentran en diferentes zonas del país, no reforzados y reforzados con mortero y malla electrosoldada. La Figura 2-17 muestra el montaje de uno de los muros de prueba utilizados.

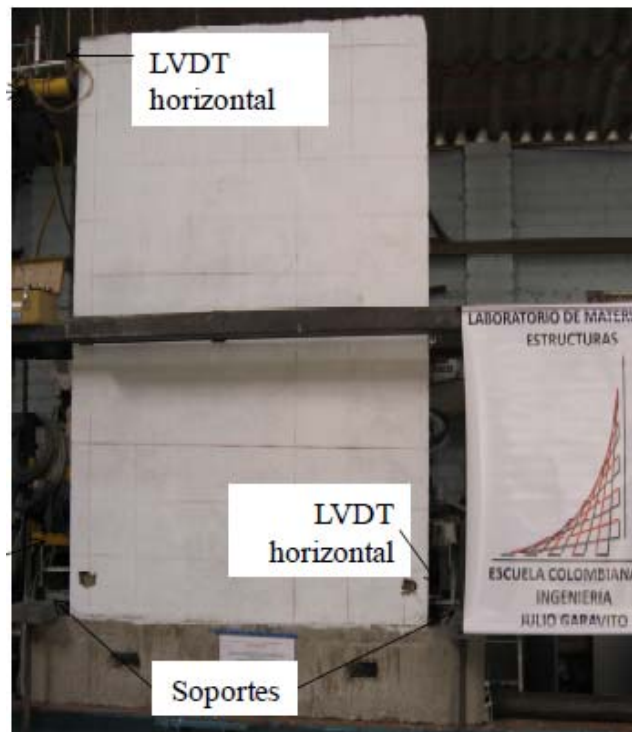
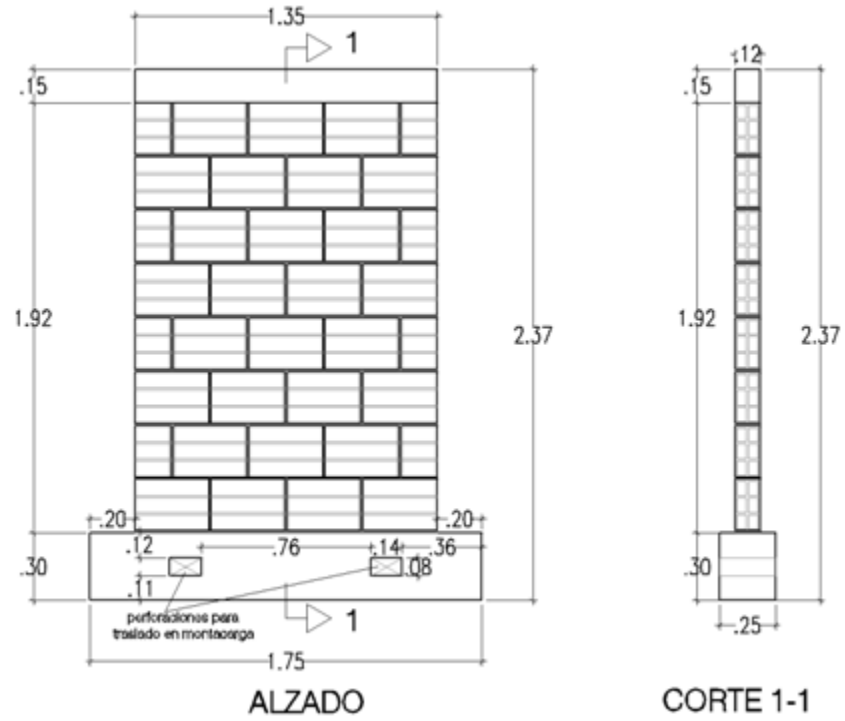
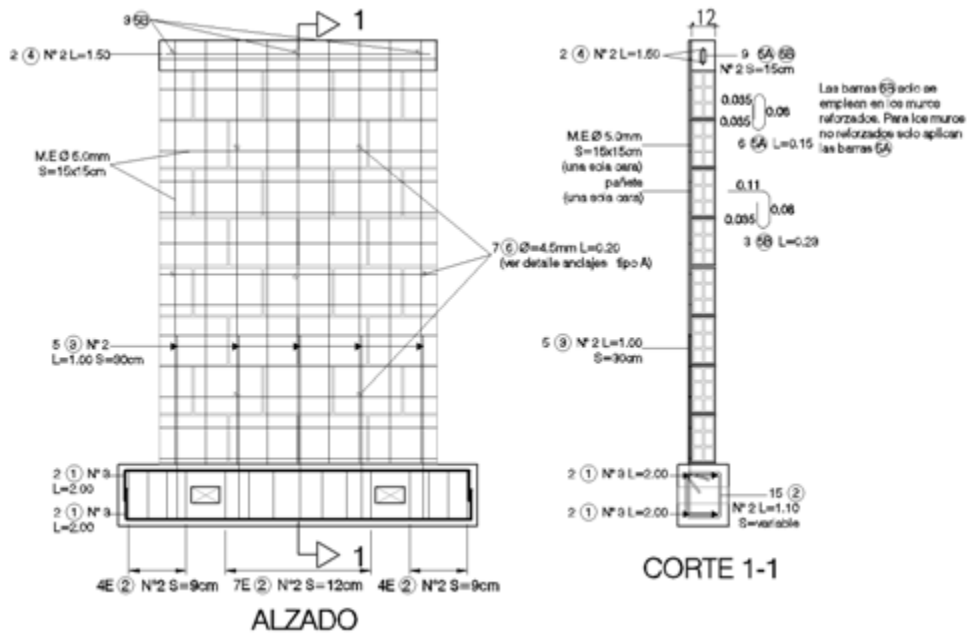


Figura 2-17 Ensayo de carga lateral monotónica
Fuente: Tomado de López, 2013. p. 78.

La Figura 2-18 muestra las dimensiones y refuerzo de un muro a escala real utilizado como espécimen de ensayo en la investigación de S. López (2013).



a)



b)

Figura 2-18 Detalle de muro a escala real.
a) Muro no reforzado, b) Muro reforzado.
Fuente: Tomado de López, 2013. p. 76.

Los resultados de la investigación de S. López (2013) encontraron que el uso de la técnica de reforzamiento con malla electrosoldada recubierta con mortero puede incrementar la resistencia a la tracción diagonal, respecto a la de muros sin ningún tipo de refuerzo, hasta en 2.5 veces en promedio; además, en todos los ensayos realizados se encontró que el sistema de reforzamiento empleado presenta un mecanismo de falla más gradual que el que se presentaba en los especímenes no reforzados, esta característica es muy útil cuando se alcanzan los estados límites de resistencia pues permite evacuar a los usuarios de la edificación lo cual sería imposible en una edificación de mampostería no reforzada (S. López, 2013, pp. 156-157).

2.2.4 Reemplazo de muros no estructurales por muros estructurales

El reemplazo de muros no estructurales por muros estructurales se utiliza cuando por la acción de las solicitaciones sobre la estructura, o la exposición frente a ambientes dañinos, se ha afectado la integridad del elemento y se requiere de un mejoramiento en su capacidad de resistencia para cumplir con las exigencias que demande la estructura.; el reemplazo puede ser parcial o total dependiendo de las características del muro y de las condiciones nuevas a las que se va a ver sometido.

El procedimiento consiste en reemplazar un muro sin refuerzo por un muro estructural; la remoción del muro debe realizarse cuidadosamente de manera que se logren adaptar dovelas de empalme con el refuerzo existente para lograr continuidad con el nuevo refuerzo; la construcción del nuevo muro debe ser lo más similar posible a la construcción del muro existente (Manual AIS, pp. 4-45); es importante que a la hora de aplicar esta técnica se tenga especial cuidado de no afectar la estabilidad de la estructura, por lo tanto, el uso de puntales para descargar parte de la estructura es fundamental para lograr este propósito.

Es recomendado que en la intervención se utilicen materiales del mismo tipo que los utilizados en los elementos que van a ser reemplazados para evitar posibles concentraciones de esfuerzos en ciertos puntos que conlleven a cambios en la configuración general de la estructura (S. Alcocer, 2003, pp. 504-505)

Las técnicas de reforzamiento expuestas anteriormente han sido las más convencionales, a la hora de realizar rehabilitaciones y reparaciones a estructuras de mampostería, en cuanto al uso de los materiales y procesos constructivos. A continuación se presenta una técnica de reforzamiento que se presentan hoy en día como una alternativa de reforzamiento frente a esas técnicas convencionales.

2.2.5 Reforzamiento externo con materiales compuestos (FRP)

Los polímeros reforzados con fibra (FRP por sus siglas en inglés) son compuestos que se han convertido en una alternativa a los materiales tradicionales para el reforzamiento de estructuras de mampostería; son ligeros, no corrosivos y presentan una alta resistencia a la tracción y módulo elástico; además en el mercado están disponibles en diferentes presentaciones, incluyendo láminas y barras de refuerzo (ACI 440-7R, 2010, p. 3).

Los materiales están compuestos por una combinación de una resina sintética y una fibra sintética, las más usadas son la resina epóxica y las fibras de carbono, vidrio y aramida; dependiendo de la fibra que se utilice, el material compuesto se denomina CFRP, GFRP y AFRP respectivamente.

Entre las ventajas que presenta el reforzamiento externo con materiales compuestos, está su fácil manejo e instalación, requieren de menos demoliciones, es una técnica no invasiva dando como resultado una menor producción de polvo, ruido y escombros y mínimos cambios en la apariencia de la estructura; la perturbación de los ocupantes y la pérdida de espacio útil también se reducen al mínimo; las propiedades dinámicas de la estructura existente no se modifican debido a que hay poca adición de peso y su rigidez no se altera. Las desventajas del material están relacionadas con la exposición del mismo al ambiente; el rendimiento frente a temperaturas elevadas disminuye, así como algunas de sus propiedades mecánicas frente a cambios de humedad y ciclos de congelamiento y deshielo. En muchas ocasiones, se hace necesario utilizar revestimientos exteriores sobre el material para contrarrestar estos problemas; de igual manera, al ser una técnica nueva, no se tiene mucho conocimiento sobre su proceso constructivo, razón por la cual se requiere de una mayor supervisión técnica en las obras (ACI 440-7R, 2010, pp. 2-3).

Los compuestos de FRP pueden ser utilizados para mejorar la capacidad a flexión y corte de estructuras o para restaurar la capacidad original de un elemento afectado por cargas

en el plano o fuera de él, que hayan causado su deterioro. Igualmente, se pueden utilizar para envolver elementos de mampostería que permitan un mejor grado de confinamiento (Tumialan, *et al.*, 2009, p. 12).

Existen dos (2) técnicas de reforzamiento con FRP que pueden ser utilizadas para rehabilitar estructuras de mampostería. A continuación se hace una breve descripción de cada una de estas técnicas:

- *Láminas de FRP adheridas externamente*

La técnica de pegado externo de láminas de FRP consiste en pegar el material compuesto a la superficie externa de los muros de mampostería que van a ser reforzados, mediante un adhesivo; las láminas pueden venir en forma de telas o de bandas, ambas están formadas por materiales compuestos de alta resistencia, las telas de FRP son típicamente tejidas con fibras individuales orientadas en una, dos o varias direcciones en láminas delgadas sin una matriz de unión. Las bandas por su parte, cuentan con una fibra unidireccional incorporada dentro de una matriz de resina que se adhiere a la superficie del muro mediante un epóxico (Tumialan, *et al.*, 2009, pp. 12-13)

La orientación que tengan las láminas en la superficie del muro depende de la propiedad que se quiera mejorar en el elemento, por ejemplo, si se desea mejorar la capacidad por corte se recomienda usar una orientación horizontal; por el contrario, si lo que se desea mejorar es la capacidad a flexión la orientación vertical será la mejor opción. Finalmente, si se desean mejorar ambas propiedades se recomienda combinar ambas orientaciones, para esto es importante aplicar las teorías de diseño que permitan saber con exactitud la cantidad de láminas a utilizar así como su correcta colocación.

En los antecedentes de investigaciones realizadas con esta técnica de reforzamiento, mostrados en el numeral 2.3 del presente documento, se presentan otras características, ventajas y desventajas de las láminas de FRP adheridas externamente.

- *Barras de FRP colocadas cerca de la superficie*

La técnica de barras de FRP colocadas cerca de la superficie, denominada NSM (near Surface mounted), consiste en la instalación de barras circulares o rectangulares de FRP, en ranuras cortadas en la superficie de la mampostería dentro de una matriz de resina. Las ranuras deben estar dimensionadas para asegurar que el adhesivo cubra totalmente las barras en su periferia; hay muchos métodos de aplicación y tipos de adhesivo que se han utilizado con éxito en el campo de los sistemas de NSM. La selección que se haga de estos debe estar de acuerdo con lo recomendado por el fabricante del sistema (ACI 440-7R, 2010, pp. 11-12).

Las ranuras donde se colocan las barras de FRP, son generalmente en las juntas de pega de la mampostería, para tener mínimos cambios en la apariencia, el proceso constructivo consiste en llenar las ranuras parcialmente de un epóxico, luego se introducen las barras y finalmente se termina de rellenar la ranura con el epóxico alrededor de la barra cubriendo completamente la ranura.

Desde el punto de vista estructural ambas técnicas de reforzamiento con materiales compuestos de FRP pueden lograr los mismos objetivos; la diferencia está en el proceso de instalación y en la estética final de la estructura, sin embargo, otros factores como la exposición a la humedad, las altas temperaturas o actos de vandalismo, pueden ser un factor determinante de selección; en este caso, las láminas colocadas exteriormente pueden tener un mayor daño que el sistema NSM ya que este último se encuentra protegido en ranuras dentro de una matriz de resina (Tumialan, *et al.*, 2009, p. 13).

En los antecedentes de investigaciones realizadas con esta técnica de reforzamiento, mostrados en el numeral 2.3 del presente documento, se presentan otras características, ventajas y desventajas de las barras de FRP colocadas cerca de la superficie (NSM).

2.3 Antecedentes de reforzamiento de muros de mampostería con FRP

Como se mencionó anteriormente, los compuestos de FRP pueden ser utilizados para mejorar la capacidad a flexión y corte de estructuras o para restaurar la capacidad original

de un elemento afectado por cargas en el plano o fuera de él, que hayan causado su deterioro.

Las estructuras de mampostería no son ajenas a esta situación, y a lo largo de su funcionalidad y servicio, se ven sometidas a cargas en el plano y fuera del mismo. A continuación se hace una breve descripción del desempeño de la mampostería frente a estas dos condiciones de carga, junto con las diferentes investigaciones y aportes realizados en cuanto al reforzamiento de muros de mampostería con materiales compuestos de FRP.

Aunque esta técnica de reforzamiento de muros de mampostería es relativamente nueva, diferentes investigaciones se han realizado, tanto en el ámbito internacional como el nacional, que han permitido estudiar el comportamiento de este material frente a las diferentes solicitaciones a las que se ve sometida una estructura de estas características.

2.3.1 Antecedentes con carga en el plano

El comportamiento de muros de mampostería no reforzada sometidos a cargas en el plano depende de varios parámetros relacionados con las propiedades geométricas, como la altura, el espesor, la esbeltez, las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión de las unidades de mampostería y el mortero, las dosificaciones de este último, la aplicación de la carga y las condiciones de apoyo (ACI 440.7R-10, pp. 22-23).

Las cargas en el plano pueden producir fallas que se caracterizan por la formación de grietas de tensión frágiles a través del mortero y la unidad de mampostería y una pérdida repentina de la capacidad de carga lateral. La guía ACI 440.7R-10 reconoce tres (3) modos de falla de muros de mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano: deslizamiento de la junta del mortero de pega, tensión diagonal y aplastamiento en la base del muro. En la Figura 2-19 se presentan estos modos de falla; los dos primeros modos están controlados por un comportamiento a corte en el cual el deslizamiento puede generarse a lo largo de una junta horizontal o a lo largo de una grieta diagonal, aunque esta falla no afecta la capacidad de carga axial, si lo hace frente a la capacidad a flexión fuera del plano; la tensión diagonal se caracteriza por grietas diagonales que se pueden propagar a través de las juntas de mortero y las unidades de mampostería. Finalmente, el modo de falla tres está controlado por la flexión y se caracteriza por la formación de este

tipo de grietas (flexión) y la trituración de las unidades de mampostería en la base cuando se supera su esfuerzo de compresión, lo que trae consigo una pérdida en la capacidad de carga del muro.

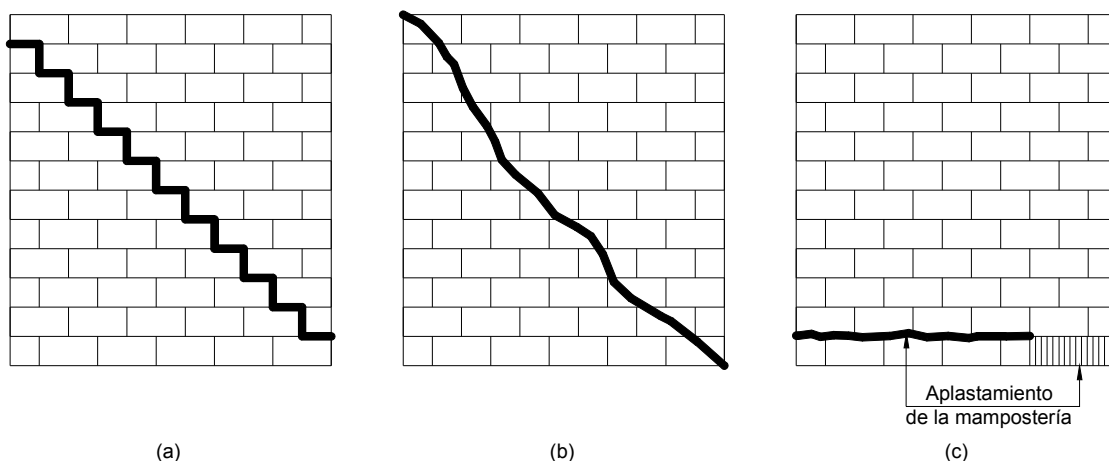


Figura 2-19 Modos de falla de la mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano.
(a) Deslizamiento de la junta, (b) Tensión diagonal, (c) Aplastamiento en la base.

Fuente: Tomado de la Guía ACI 440.7R-10. p. 23.

A continuación se hace una descripción cronológica de diferentes investigaciones realizadas hasta el momento, de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos de FRP, que son sometidas a cargas en su plano.

Schwegler (1995), investigó métodos para fortalecer los muros de corte de mampostería con láminas de FRP; el objetivo de este estudio fue determinar la forma de aumentar la ductilidad del sistema, generar una distribución uniforme de grietas y aumentar la capacidad de carga. La fibra utilizada fue de carbono; esta se colocó con una orientación diagonal en los muros de mampostería y se anclaron mecánicamente a las losas contiguas de concreto reforzado; los resultados de la prueba mostraron que el muro tuvo un aumento en la resistencia a la rotura y el desplazamiento de 50% a 300% respectivamente, en comparación con el espécimen sin ningún sistema de refuerzo aplicado a la superficie. Con relación al reforzamiento realizado en una o ambas caras, se observó que en el caso de la aplicación de una sola cara, la capacidad era de la mitad frente a la obtenida reforzando las dos caras, sin ningún otro efecto importante sobre la capacidad de carga en el plano. En todos los muros reforzados, se observaron grietas finas perpendiculares a las láminas de FRP con separación constante y espesor pequeño.

Hartley et al. (1996), ensayaron a compresión dos muros a escala real con unidades de mampostería de concreto de 0,20 m de espesor, 2,44 m de altura y 6,10 m de largo para investigar la viabilidad de utilizar bandas de CFRP unidireccionales con el fin de reparar los daños causados por asentamientos diferenciales en la cimentación de los muros. En el estudio, las cargas de asentamiento se aplicaron primero para inducir agrietamientos característicos; posteriormente, se reforzaron los muros con polímeros reforzados con fibras de carbono y se ensayaron de nuevo. En los resultados se registraron ganancias en la fuerza de más del 50% lo cual concluyó que este material compuesto (CFRP) era adecuado para la rehabilitación de muros de mampostería de bloques de concreto afectados por el asentamiento de la cimentación.

Valluzzi et al. (2002), estudiaron el comportamiento al corte de especímenes de mampostería reforzados con láminas de FRP; en el programa experimental construyeron 33 muestras de prueba de 0,51 m de largo, 0,51 m de alto y 0,12 m de espesor con ladrillos macizos de 5.5x25x12 cm y juntas de mortero de pega de 1,0 cm de espesor. 9 de las muestras estaban sin reforzamiento, mientras que las 24 restantes tenían diferentes configuraciones de reforzamiento y diferentes materiales de FRP; 9 eran con CFRP (Fibra de carbono), 10 con GFRP (Fibra de vidrio) y 5 con PVAFRP (Fibra de polivinilo de alcohol). El reforzamiento se evaluó colocando las fibras en una cara y en ambas caras, las muestras fueron sometidas a pruebas de tracción diagonal midiendo las deformaciones horizontales y verticales mediante transductores de desplazamiento; las muestras no reforzadas presentaron una falla frágil a lo largo de la diagonal y los especímenes reforzados por una sola cara también presentaron un patrón de falla con una grieta a lo largo de la diagonal con cargas de falla incluso inferiores a las de los especímenes sin refuerzo. Las muestras mostraron una clara deformación por flexión durante las fases de carga a lo largo de la diagonal no reforzada, razón por la cual, el daño principal se concentró en el lado no reforzado, este fenómeno de flexión fue causado por una diferencia notable de rigidez en los lados opuestos como resultado de la armadura asimétrica. En cuanto a las configuraciones de reforzamiento, el refuerzo en diagonal mostró un mejor comportamiento que el reforzamiento en cuadrículas (horizontal y vertical). Por otro lado, en los especímenes reforzados por ambas caras, el mecanismo de falla se presentó por el desprendimiento o ruptura de la lámina de la superficie del muro aumentando la resistencia a la rotura notablemente en casi todos los casos; el reforzamiento en cuadrícula generó la formación de grietas en diferentes direcciones mientras que el refuerzo en diagonal

presentó una grieta general que dividía el espécimen en dos partes. Las conclusiones finales de la investigación están relacionadas con la falta de eficacia del sistema cuando se utiliza reforzamiento por un solo lado del muro, en términos de la capacidad de corte; la configuración de refuerzo en diagonal presentó un mejor desempeño con respecto al refuerzo en cuadrícula, sin embargo, este último tuvo una mejor distribución de esfuerzos produciendo una propagación de grietas y causando fallas menos frágiles. En cuanto a los materiales de FRP utilizados (carbono, vidrio y polivinilo de alcohol) se encontró que el menos rígido producía un mejor desempeño en el muro en cuanto a resistencia y rigidez atribuido a que el material más débil necesita un área de mayor adherencia, es decir que la fibra de vidrio (GFRP) fue la más eficaz a la hora de estudiar el aumento de la capacidad de corte.

Elgawady et al. (2006), estudiaron el comportamiento sísmico en el plano de muros de mampostería reforzados con compuestos de FRP; ensayaron once muros, de los cuales, seis correspondía a una relación Altura/Longitud mayor que 1,0 y los otros cinco a una relación Altura/Longitud menor que la unidad. El procedimiento de los ensayos consistió en probar los muros sin reforzamiento para evaluar el grado de daño, después se reforzaron los muros con materiales compuestos, por una sola cara, y se volvieron a ensayar para esta vez evaluar el desempeño del reforzamiento, las fibras utilizadas fueron de vidrio (GFRP), carbono (CFRP) y aramida (AFRP). La Figura 2-20 muestra las dimensiones de los especímenes utilizados.

Las configuraciones de reforzamiento estudiadas por Elgawady fueron en diagonal (X) y cubriendo completamente el muro de fibra (Total). En la Figura 2-21 y la Figura 2-22 se muestran algunos especímenes de prueba construidos para los ensayos, en la parte izquierda se observa el muro sin reforzar y en la derecha con su respectivo reforzamiento.

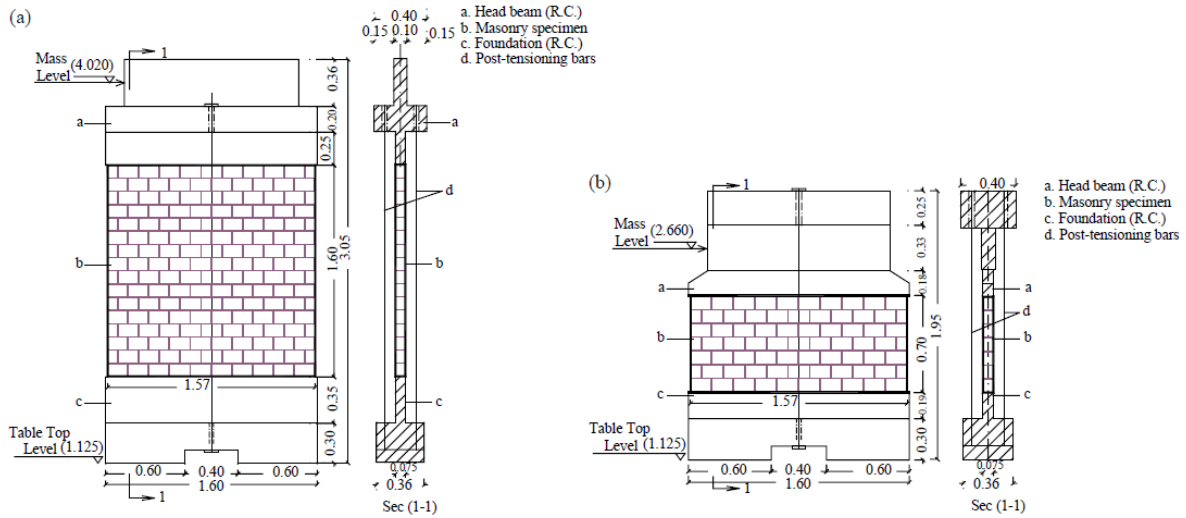


Figura 2-20 Dimensiones de los especímenes.
(a) Altura/Longitud mayor que 1, (b) Altura/Longitud menor que 1.
Fuente: Tomado de Elgawady, et al. (2006). p. 149.

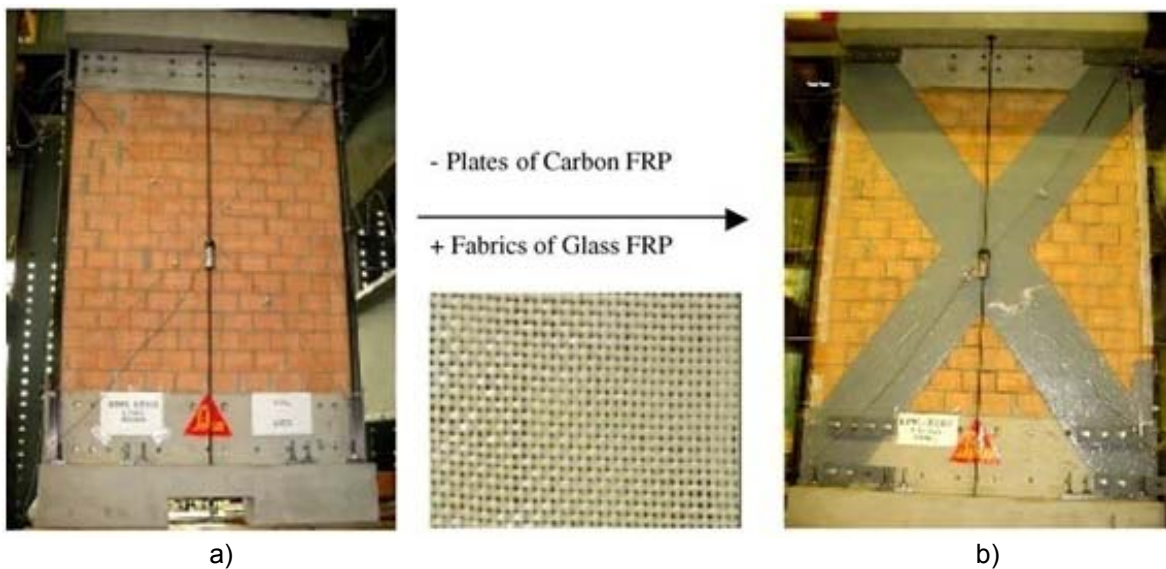


Figura 2-21 Espécimen de prueba de relación Altura/Longitud mayor que 1, con configuración de reforzamiento en diagonal.

a) Muro sin reforzar, b) Muro reforzado.
Fuente: Tomado de Elgawady, et al. (2006). p. 150.

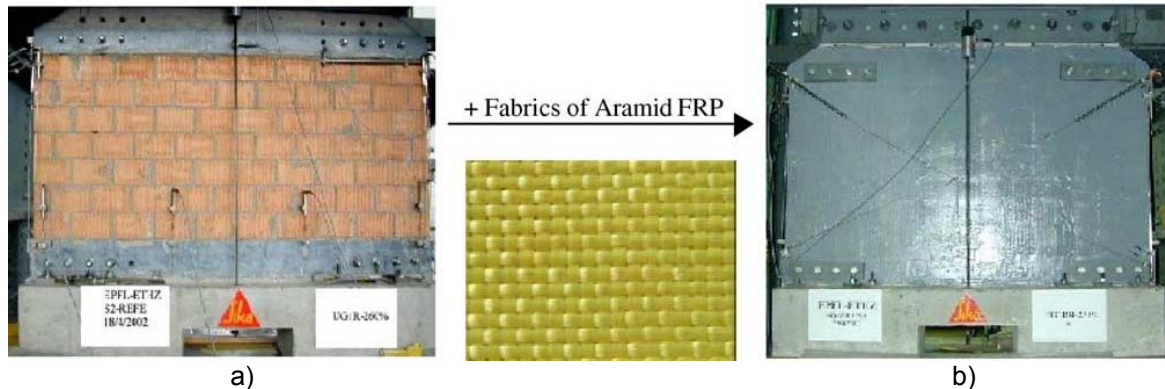


Figura 2-22 Espécimen de prueba de relación Altura/Longitud menor que 1, con configuración de reforzamiento completa alrededor de todo el muro.

a) Muro sin reforzar, b) Muro reforzado.

Fuente: Tomado de Elgawady, et al. (2006). p. 151.

En esta investigación se encontró que para todos los materiales compuestos la resistencia lateral se incrementó en factores entre 1,3 y 2,9. Los especímenes de mayor esbeltez, reforzados completamente, presentaron una falla típica por flexión representada por un aplastamiento en la base, en la zona de compresión, produciendo la destrucción de las unidades de mampostería en esta parte del muro, y la rotura de la fibra. La configuración de reforzamiento en diagonal (X) tuvo una resistencia menor que la configuración completa, sin embargo, presentó un aumento de resistencia con respecto a las muestras sin reforzar; los compuestos de FRP también produjeron un aumento de la rigidez lateral de los muros y les permitieron una mayor deformación que a los muros no reforzados, para los especímenes más esbeltos, la distribución de deformaciones a lo largo de la sección transversal tuvo un comportamiento lineal, incluso hasta la falla (Elgawady, *et al.*, 2006).

Turco et al. (2006), estudiaron el comportamiento a corte de muros de mampostería no estructural, sometidos a cargas en el plano, reforzados con barras de FRP colocadas cerca de la superficie (NSM). Construyeron 6 especímenes de prueba utilizando bloque de concreto, barras circulares de fibra de vidrio, dimensiones de ranuras entre 10 y 12 mm y epóxico embebido en las ranuras; las dimensiones nominales de los muros eran de 1.60x1.60x0.15 m. Para el reforzamiento se utilizaron tres configuraciones: barras embebidas en cada junta horizontal (cada hilada) por un lado del muro y barras embebidas cada dos juntas horizontales en una y ambas caras del muro; el ensayo se realizó aplicando carga en las esquinas de los muros con una orientación de la carga de 45° (ensayo de tracción diagonal), se ubicaron LVDT's en la diagonal de los muros para medir

las deformaciones. La falla presentada fue una falla frágil producida entre la unidad y la junta de mortero, los resultados de la investigación demostraron que este tipo de reforzamiento de muros de mampostería no estructural aumenta la capacidad a corte de los muros hasta en un 150%.

Marcari et al. (2007), estudiaron el comportamiento a corte en el plano de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos. Los especímenes de prueba buscaban representar los muros típicos de construcciones antiguas del sur de Italia, estos estaban formados por dos hiladas independientes con el interior relleno de mortero y piedra, las dimensiones en general eran de 1,57m de altura, 1,48m de largo y 0,53 m de ancho. En total se construyeron 21 especímenes de prueba, 2 se ensayaron a compresión uniaxial, sin ningún tipo de refuerzo para conocer este comportamiento, aplicando carga con un gato hidráulico y midiendo deformaciones horizontales y verticales con LVDT's ubicados en ambas caras del muros hasta llevarlos a la falla, caracterizada por grietas que se propagaron a lo largo del muro. Los 19 especímenes restantes se ensayaron de la siguiente manera: 4 con fibra de carbono (CFRP) con una configuración de refuerzo en diagonal, 4 con el mismo material pero con un reforzamiento en grilla (horizontal y vertical), 3 con fibra de vidrio (GFRP) con una configuración en cruz, 4 con fibra de vidrio con una orientación en grilla, y finalmente los últimos 4 como especímenes de control. Todos los reforzamientos se realizaron por ambas caras de los muros. El ensayo se realizó colocando una carga en compresión constante de 400 kN, y la carga lateral se aplicó en función del desplazamiento, a razón de 2 mm/s, hasta alcanzar la falla de los muros. Los modos de falla se caracterizaron por la formación de grietas anchas a lo largo de la mampostería en la zona reforzada; en los muros que tenían fibra de vidrio la falla se acompañó de un desprendimiento de la fibra en la zona de tensión llegando hasta la rotura de la misma, y de un aplastamiento de la fibra en la zona de compresión; los que tenían por su parte fibra de carbono, presentaron un comportamiento similar sin llegar a la rotura. Los resultados de la investigación mostraron un mejoramiento de la resistencia al corte, con un aumento de la rigidez lateral de los muros reforzados con FRP; los datos obtenidos de deformación y módulo de elasticidad permitieron inferir que la fibra de vidrio es más compatible con la mampostería que la fibra de carbono, logrando así un aumento en la resistencia.

Santa María & Alcaíno (2008), también estudiaron la resistencia al corte en el plano de muros de mampostería reforzados exteriormente con fibras de carbono (CFRP). En su investigación construyeron 16 muros de dimensiones 2,40x1,98x0,14m, utilizando dos configuraciones de reforzamiento, una horizontal y otra en diagonal. 4 especímenes tenían refuerzo horizontal adicional y los 12 restantes no lo tenían; este consistía en barras de 4.2 mm de diámetro (escaleras) ubicados cada tres hiladas. Los muros sin refuerzo horizontal adicional tuvieron aumentos en resistencia máxima de entre 50% y 80%, mientras que los reforzados con la escalera, entre 13% y 34%; todos los muros tuvieron aumentos importantes en su capacidad de deformación lateral, aumentando entre 70% y 110% la deformación asociada a la carga máxima, el refuerzo de CFRP redistribuyó las grietas y disminuyó su espesor, se observó que si el refuerzo de CFRP se distribuye en el muro, la falla es menos frágil al compararlo con los muros con refuerzo centrado. La Figura 2-23 muestra las dimensiones de los muros, el refuerzo adicional y las configuraciones de reforzamiento utilizadas en la investigación de Santa María y Alcaíno.

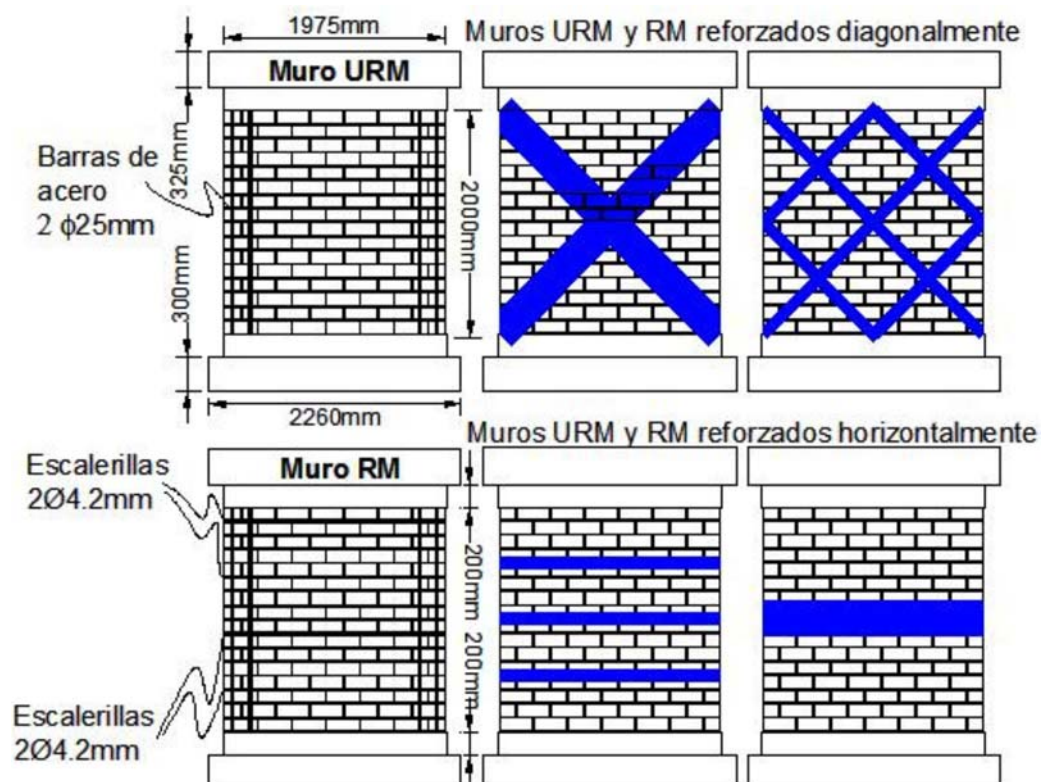


Figura 2-23 Dimensiones de muros y configuraciones de reforzamiento
Fuente: Tomado de Santa María & Alcaíno (2008). p. 4.

Para el ensayo, Santa María & Alcaíno (2008) sometieron los muros a carga cíclica horizontal con ayuda de un actuador de carga dinámica, y carga vertical constante. Los modos de falla de los muros sin refuerzo horizontal (escalerilla) reforzados con CFRP fueron caracterizados como una falla frágil con una gran grieta en cada diagonal acompañada por una red de grietas más finas alrededor de ella y por un fuerte daño en la zona de compresión del muro, quedando con una resistencia residual prácticamente nula. Por otra parte, los muros con refuerzo horizontal convencional (escalerilla) reforzados con bandas de CFRP presentaron una falla progresiva comenzando con un desprendimiento de la fibra de la cara del muro (ver Figura 2-24), seguido del arrancamiento de la misma de la zona de anclaje produciendo una falla relativamente frágil.

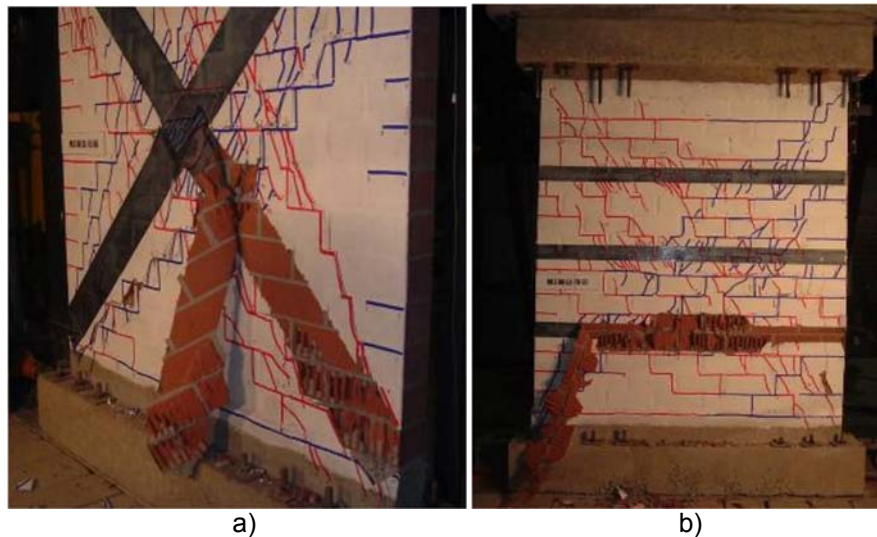


Figura 2-24 Desprendimiento de la fibra de la cara del muro.
a) Configuración de refuerzo en diagonal, b) Configuración de refuerzo horizontal.
Fuente: Tomado de Santa María & Alcaíno (2008). p. 12.

Los mismos autores en la investigación encontraron que la presencia de refuerzo externo de telas de FRP en muros de albañilería cambia su patrón de agrietamiento, aumentando la cantidad de fisuras y disminuyendo su espesor, en diferentes medidas dependiendo de la cantidad y disposición del refuerzo. El uso de refuerzos externos de telas de FRP disminuye la fragilidad de la falla y aumenta en mayor o menor grado la resistencia residual de los muros, dependiendo principalmente de su configuración, los muros reforzados con una sola franja de tela, ya sea diagonal u horizontal, mostraron una falla más frágil que aquellos muros que fueron reforzados con varias franjas paralelas de tela. Finalmente, los

muros reforzados en diagonal desarrollaron mayores resistencias totales que los muros con refuerzo equivalente horizontal; sin embargo, el aumento por cada m^2 de refuerzo utilizado fue mayor en el caso de los muros reforzados horizontalmente, ya que el refuerzo horizontal trabaja en ambas direcciones y además requiere de menor longitud que el refuerzo diagonal, resultando ser más económico utilizar refuerzo horizontal (Santa María & Alcaino, 2011).

Luccioni & Rougier (2011), estudiaron el comportamiento mecánico bajo cargas de compresión en el plano y tracción diagonal de muros de mampostería de arcilla reforzados con bandas de fibra de carbono. Los especímenes tenían dimensiones de $0,58 \times 0,61 \times 0,13$ m y $0,56 \times 0,55 \times 0,13$ m. En las Figuras 2-25 y 2-26 se presentan las configuraciones de refuerzo de los ensayos de compresión y tracción diagonal respectivamente.

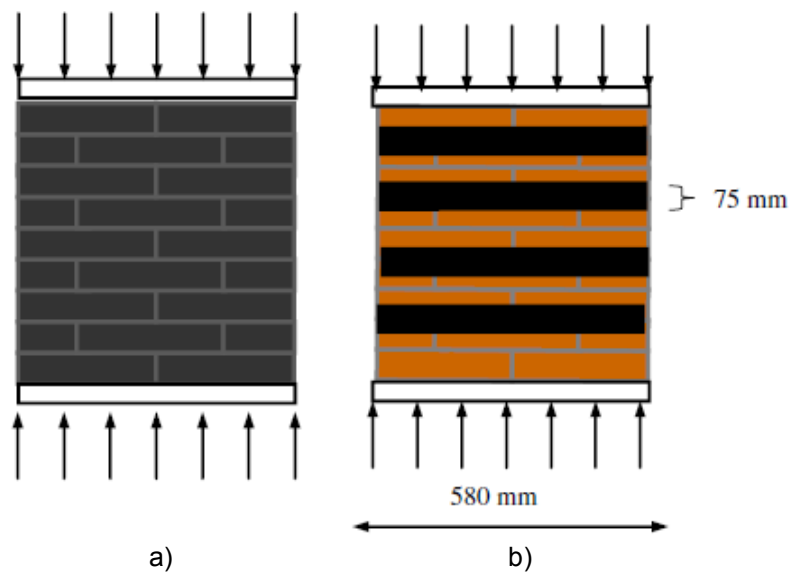


Figura 2-25 Configuraciones de refuerzo del ensayo de compresión.

a) Completamente reforzado, b) Bandas horizontales.

Fuente: Tomado de Luccioni & Rougier (2011). p. 1775.

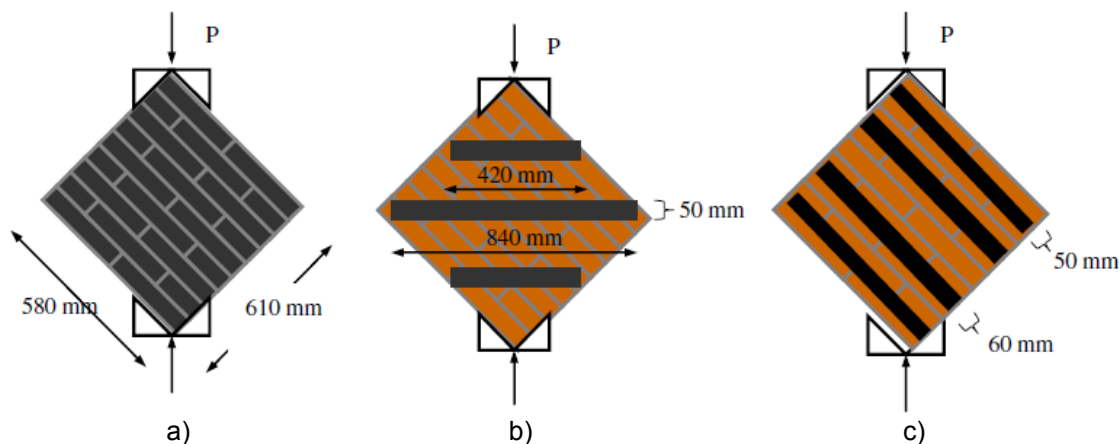


Figura 2-26 Configuraciones de refuerzo del ensayo de tracción diagonal.

a) Completamente reforzado, b) Bandas en dirección de la diagonal, c) Bandas paralelas a las hiladas.

Fuente: Tomado de Luccioni & Rougier (2011). p. 1777.

Los resultados de la investigación de Luccioni & Rougier (2011), muestran que el reforzamiento con polímeros reforzados con fibra mejora el comportamiento de la mampostería, aumentando la ductilidad, la resistencia última y la rigidez, así como la capacidad de deformación. De esta manera, el comportamiento de falla frágil y repentina de la mampostería no reforzada puede ser evitado.

Triantafyllou et al. (2011), ensayaron muros de mampostería ante carga cíclica en el plano de flexión combinada con fuerza axial, flexión fuera del plano y corte en el plano con fuerza axial. Los parámetros considerados fueron el número de capas de refuerzo (una o dos capas, aplicadas en ambos lados), el tipo de rejilla (estructuras de malla abierta que comprenden fibras de carbono, de vidrio o de basalto y de polipropileno o poliéster), el tipo de agente de unión (morteros de diferentes composiciones o resinas epóxicas) y el nivel de esfuerzos de compresión aplicados a las muestras sometidas en el plano de carga. Los resultados obtenidos determinaron un aumento en la resistencia y una mayor capacidad de deformación de los muros ensayados.

Capozzuca (2011), realizó ensayos sobre especímenes de mampostería no reforzados sometiéndolos a carga cíclica en el plano hasta alcanzar un cierto nivel de daño; posteriormente los muros fueron reforzados con bandas de fibra de carbono y se volvieron

a ensayar bajo la misma sollicitación. La configuración de reforzamiento utilizada fue en grilla (bandas horizontales y verticales) y en diagonal (X). La Figura 2-27 muestra el montaje de uno de los ensayos realizados; los modos de falla estuvieron caracterizados por la aparición de grietas en la zona reforzada que aumentaban su tamaño a medida que los ciclos de carga iban subiendo.

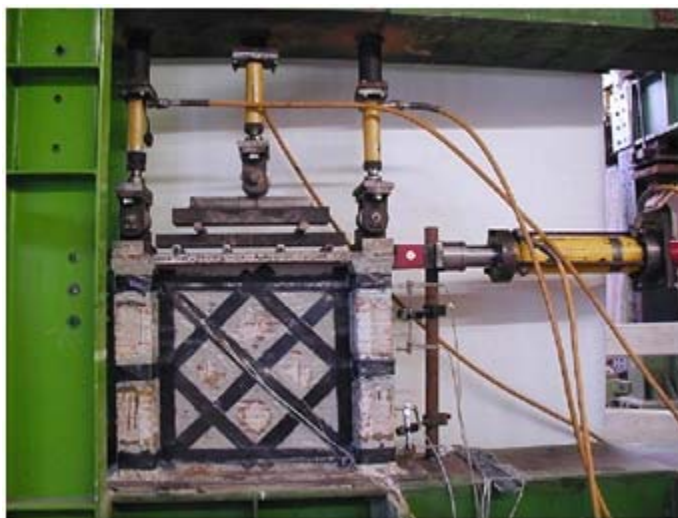


Figura 2-27 Montaje del ensayo con configuración de reforzamiento en diagonal.
Fuente: Tomado de Capozucca (2011). p. 284.

Los resultados de la investigación de Capozucca (2011), mostraron que el reforzamiento de estructuras de mampostería con materiales compuestos (FRP) confiere a ellas una mayor resistencia y capacidad de deformación permitiendo una mayor disipación de energía a través de la propagación de las grietas. La configuración de refuerzo en diagonal presenta una mayor ganancia en la resistencia que la configuración en grilla, evitando de alguna manera el fenómeno de delaminación (desprendimiento) de la fibra de la cara del muro lo cual causa una disminución de la capacidad de resistencia del sistema.

Mosallam & Banerjee (2011), estudiaron el comportamiento a corte de muros de mampostería de concreto reforzados con materiales compuestos; elaboraron 6 especímenes de prueba de 1.83 x 1.83 m y los sometieron a carga cíclica en el plano, 2 muros fueron ensayados sin refuerzo, uno se llevó hasta la falla y el otro hasta obtener la primera grieta diagonal. Los dos se tomaron como muestras de control y pre-grieta, respectivamente, el segundo muro (el de pre – grieta) fue reparado y reforzado junto con

los demás especímenes; las configuraciones de reforzamiento incluían toda el área del muro por uno de sus lados (2 especímenes), sus dos lados (2 especímenes) y bandas horizontales espaciadas cada 10 cm en un solo lado (1 espécimen); el material de refuerzo consistió en tejidos de fibra de carbono y de vidrio. Los resultados de la investigación mostraron una ganancia en la resistencia al corte de hasta un 20% en el muro reparado en comparación con el muro ensayado sin refuerzo, y de un 35% en los muros reforzados desde un inicio. Con el reforzamiento, el modo de falla de los muros cambia de grietas diagonales (falla frágil) a un aplastamiento de las unidades en la base del muro, en la zona de compresión (falla un poco más dúctil). De igual manera, la capacidad de deformación también mejora sustancialmente. La figura 2-28 muestra uno de los especímenes de ensayo reforzados completamente.



Figura 2-28 Montaje del ensayo de muro reforzado completamente.
Fuente: Tomado de Mosallam & Banerjee (2011). p. 1659.

A. San Bartolomé & Coronel (2011), con el propósito de estudiar la efectividad del reforzamiento de muros de mampostería con materiales compuestos, construyeron y sometieron un muro de mampostería confinada a carga cíclica en el plano, de manera que presentara una falla por corte; posteriormente el muro fue resanado y reforzado con bandas de fibra de carbono y se volvió a someter el espécimen a la misma prueba. La Figura 2-29 muestra el muro reparado con el reforzamiento de fibra de carbono, el patrón de falla evidenciado fue de fisuras diagonales que fueron aumentando hasta romper la fibra, igualmente, también se presentó desprendimiento de la banda en algunas zonas.



Figura 2-29 Muro resanado y reforzado con fibra de carbono
Fuente: Tomado de San Bartolomé & Coronel (2011). p. 6.

Los resultados de la investigación de San Bartolomé (2011) mostraron un aumento en la rigidez lateral y resistencia del muro con respecto al muro sin refuerzo. El tamaño de las grietas también disminuyó y se controló con el reforzamiento de la fibra.

Kalali & Kabir (2012), realizaron ensayos de tracción diagonal en muros de mampostería reforzados con fibra de vidrio (GFRP) para evaluar la eficiencia al corte de este material. Construyeron 7 especímenes de prueba de 0.56x0.56x0.11 m, de los cuales 2 se ensayaron sin ningún tipo de refuerzo presentando una falla frágil de ruptura del elemento en la dirección de aplicación de la carga; los 5 muros restantes se reforzaron con configuraciones en diagonal, en grilla y cubriendo completamente la superficie del muro. Los resultados de la investigación mostraron que la resistencia al corte aumentó entre 2.45 a 4.32 veces con respecto a los muros sin refuerzo, la capacidad de desplazamiento y la ductilidad (disipación de energía) también aumentaron; en cuanto a las configuraciones de reforzamiento, la diagonal resultó ser más eficiente que la de grilla; con el reforzamiento se obtuvo una falla menos frágil hasta el punto donde la fibra comenzó a desprenderse de la cara del muro.

Konthesingha et al. (2013), evaluaron la capacidad a corte lateral en especímenes de mampostería reforzados con barras de CFRP colocadas cerca de la superficie (NSM). Construyeron y probaron 16 paneles de muros de mampostería de 1.20x1.20 m sin

refuerzo; luego colocaron el material de refuerzo y los reensayaron ante carga lateral cíclica con una precarga de compresión. Los resultados mostraron un aumento en el desplazamiento de los elementos y una mayor capacidad de disipación de energía en relación con los especímenes sin reforzar.

En Colombia también se han realizado investigaciones para evaluar el desempeño de muros de mampostería cuando se refuerzan con polímeros reforzados con fibra. H. López (2012), desarrolló una investigación en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería donde estudió el comportamiento estructural bajo cargas laterales cíclicas en el plano de pórticos de concreto con muros de relleno conformado por unidades macizas de mampostería en concreto, reforzados con tejidos de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) y de vidrio (GFRP) adheridos externamente en la mampostería. Se construyeron 6 especímenes de dimensiones 2.15x1.50x0.15 m, las configuraciones de reforzamiento de la fibra que se utilizaron fue en grilla, vertical y horizontal. La Figura 2-30 muestra el montaje de uno de los especímenes.

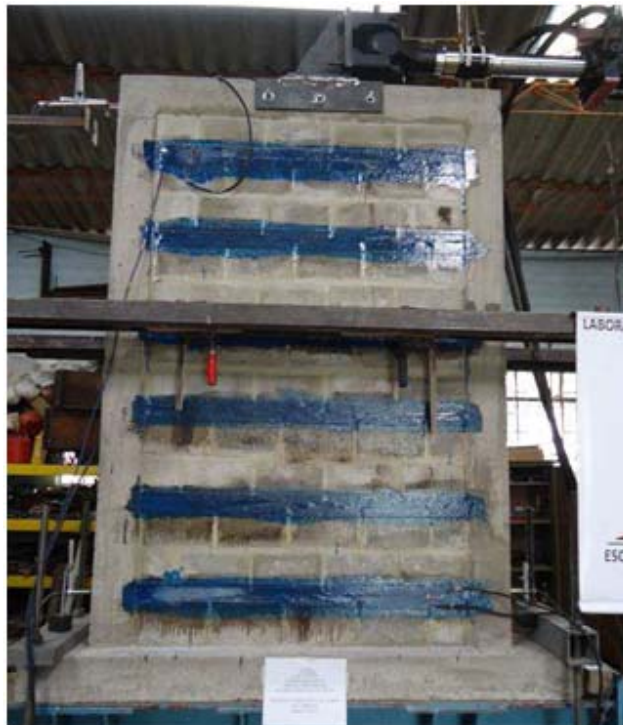


Figura 2-30 Espécimen de prueba con refuerzo de fibra de carbono horizontal
Fuente: López (2012). p. 41.

Los resultados de la investigación de H. López (2012), mostraron incrementos en la resistencia entre 3.0 y 3.7 veces con respecto a los especímenes sin reforzar. La capacidad de deformación también mejoró alcanzando valores de hasta el 3.0% de la altura del elemento.

Bastidas et al. (2002), realizaron ensayos en la Universidad de Los Andes; construyeron 26 muretes de mampostería de arcilla de bloques de perforación horizontal y un muro a escala real de 2.2 x 3.0 x 0.09 m, y los reforzaron con fibra de vidrio (GFRP) utilizando diferentes configuraciones de reforzamiento. Los muretes fueron sometidos a ensayos de tracción diagonal y el muro a escala real, fue sometido a carga cíclica en el plano. La Figura 2-31 muestra una imagen del montaje del ensayo del muro a escala real.



Figura 2-31 Montaje de muro a escala real

Fuente: Bastidas et al. p. 9.

Los resultados de la investigación de Bastidas et al. (2002), encontraron que el reforzamiento de estructuras de mampostería con materiales compuestos es de gran ayuda a la hora de reducir los daños causados por fenómenos telúricos. Estos materiales mejoran la resistencia al corte y capacidad de deformación del sistema, reduciendo el daño global y generando una mayor estabilidad de la estructura.

2.3.2 Antecedentes con carga fuera del plano

Las cargas sísmicas fuera del plano inducen flexión en los muros debido a las restricciones de los entresijos. En el análisis de los modos de falla deben tenerse en cuenta muchos factores, como las condiciones de frontera, la resistencia a la compresión de los muros, la resistencia a la tracción de las juntas, la rigidez del muro, y las cargas aplicadas. Los muros, normalmente permanecen estables bajo carga muerta y después de la fisuración, si están dentro de una relación altura–espesor especificada. Si se excede esa relación de esbeltez, el muro necesitará de arriostramientos como puntales horizontales o columnas verticales. Los parapetos, chimeneas y elementos similares que se extienden por encima de la línea superior de la restricción son los más vulnerables a las cargas fuera del plano (Gilstrap & Dolan, 1998).

A continuación se hace una descripción cronológica de diferentes investigaciones realizadas hasta el momento, de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos de FRP, que son sometidas a cargas fuera del plano.

Ehsani & Saadatmanesh (1996), investigaron el comportamiento a flexión de muros de mampostería reforzados con láminas de fibra de vidrio (GFRP). Las dimensiones de los especímenes utilizados fueron 0,22 m de ancho, 0,10 m de altura y 1,45 m de largo, las muestras se sometieron a cargas puntuales en cuatro puntos produciendo esfuerzos de flexión en el elemento; se observó una falla por tensión cuando se utilizó una relación baja de refuerzo del material compuesto, cuando se incrementó el número de capas, la mampostería presentó una falla por compresión, la capacidad de flexión se aumentó hasta 24 veces en comparación con la muestra de control no reforzada. De acuerdo con los resultados de las pruebas, los efectos de la resistencia del mortero parecían ser insignificantes y ambas muestras con relación de refuerzo de material compuesto alta fallaron por aplastamiento de la mampostería.

Hamoush et al. (2002), ensayaron 18 muros de mampostería de unidades de concreto de perforación vertical, reforzados externamente con compuestos de FRP, para estudiar la resistencia al corte frente a cargas fuera del plano 9 especímenes fueron reforzados con una capa de fibra de vidrio y los otros 9 con dos capas del mismo material. Las variables a evaluar en la investigación incluían 3 medidas diferentes de la fibra de vidrio, el reforzamiento con una y dos capas y las longitudes de desarrollo de las fibras más allá de

los soportes. Las dimensiones de los especímenes eran 0,90x 0,60x 0,20 m y las dimensiones de la fibra de vidrio de 0,60x 0,70m, 0,60x 0,80 m y 0,60 x 0,90 m; esta última fue adherida a la superficie de los muros con una matriz de resina epóxica. Los muros se ensayaron en posición horizontal, utilizando el principio de viga simplemente apoyada, se aplicó carga en dos puntos hasta alcanzar la falla; en tres muestras se presentó una falla diagonal por corte típica; las 15 restantes presentaron una ruptura de la junta de mortero seguido de la aparición de grietas diagonales que se propagaron por la fibra hasta su final. En la investigación se encontró que este reforzamiento mejora la capacidad a flexión de los muros, la adición de más de una capa de FRP aumenta la integridad estructural del sistema y cuando se utiliza una sola capa de reforzamiento la longitud de desarrollo más allá del soporte tiene una influencia menor en el comportamiento del sistema.

Galati et al. (2006), estudiaron el comportamiento a flexión de muros de mampostería no estructural, sometidos a cargas fuera del plano, reforzados con barras de FRP colocadas cerca de la superficie (NSM). Construyeron 15 especímenes de prueba, con diferentes cantidades de refuerzo, formas de barras, dimensiones de ranuras y materiales embebidos en las ranuras, se construyeron 3 muros con ladrillos de arcillas y los 12 restantes con bloques de concreto. Las dimensiones nominales eran de 1.22x0.61 m y 95 mm de espesor para los de arcilla y de 92 mm hasta 143 mm para los de concreto; para el reforzamiento utilizaron barras de fibra de vidrio de 6.35 mm y 9.53 mm de diámetro y barras rectangulares de fibra de carbono de 2x15.24 mm y 2x16 mm. El ensayo se realizó aplicando carga, con un gato hidráulico de 12 ton., en dos puntos ubicados a 101.6 mm del centro de la luz de ensayo. Los modos de falla obtenidos fueron tres: desprendimiento del FRP de la ranura, falla por flexión (aplastamiento de las unidades de mampostería en la compresión y ruptura del FRP en la tensión) y falla por corte de la mampostería en los apoyos; las conclusiones de la investigación demostraron que este tipo de reforzamiento de muros de mampostería no estructural aumenta la capacidad a flexión de los muros entre 2 a 14 veces y mejora su ductilidad, los resultados mostraron tres tipos de fallas; el primero una falla por corte relacionado con el material matriz (en este caso la mampostería) y los otros dos relacionados con el material de refuerzo, una falla por flexión (ruptura del FRP) y otra por desprendimiento del FRP. En el caso del reforzamiento con barras rectangulares, el deslizamiento de la barra dentro del epóxico causó un aumento en la ductilidad.

Willis et al. (2010), también realizaron investigaciones sobre el comportamiento a flexión de muros de mampostería reforzados con barras de fibra de carbono (NSM) sometidos a

cargas fuera del plano. Elaboraron 4 especímenes de 0,84 x 0,51 x 0,10 m colocando una barra de CFRP en la zona de tensión; el muro se ensayó horizontal aplicando el principio de viga simplemente apoyada; los resultados mostraron una mejor propagación de las grietas en la mampostería y un aumento en la resistencia del muro frente a esta sollicitación.

Dizhur et al. (2014), investigaron el comportamiento de muros de mampostería reforzados con barras de CFRP colocadas cerca de la superficie (NSM) sometidas a carga fuera del plano (perpendicular al plano). En el programa experimental construyeron nueve vigas de mampostería y cinco muros de mampostería a escala real; los resultados de las pruebas confirmaron que la técnica de adaptación NSM-CFRP es una opción mínimamente invasiva para brindar a los muros de mampostería la capacidad para resistir las fuerzas laterales fuera del plano inducidas en un terremoto. El uso de barras de CFRP orientadas verticalmente aumentó significativamente la resistencia a la flexión después de la formación de grietas y la ductilidad de los muros de mampostería. En la Figura 2-32 se presenta el montaje del ensayo en las vigas de mampostería y un espécimen durante la prueba. La Figura 2-33 presenta el montaje del ensayo en los muros a escala real y uno de los especímenes deformados durante el proceso de carga.

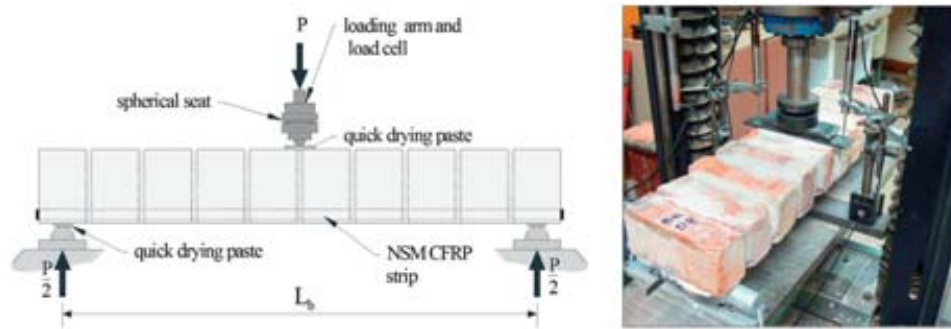


Figura 2-32 Montaje de la viga de mampostería (Izq.) y espécimen durante la prueba (Der.)
Fuente: Dizhur et al. p. 336.

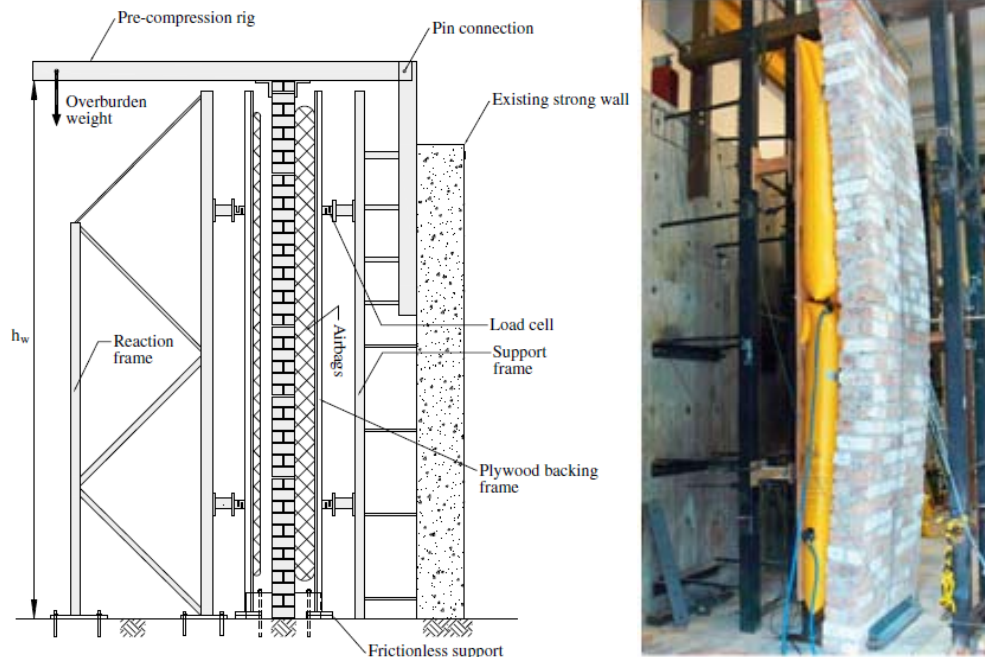


Figura 2-33 Montaje del muro a escala real (Izq.) y espécimen deformado durante la prueba (Der.)
Fuente: Dizhur et al. p. 338.

Con los antecedentes descritos anteriormente, es claro resaltar que el uso de materiales compuestos para reforzar estructuras de mampostería es cada día más frecuente, dado que mejora notablemente su capacidad a la hora de resistir cargas laterales en su plano y fuera del mismo. La presente investigación buscó aplicar estos conceptos de reforzamiento a muros construidos con características y materiales del medio local y así confirmar las ventajas y beneficios de los polímeros reforzados con fibra; también se hizo énfasis en los sistemas de anclaje que permitieran garantizar la adecuada transferencia de cargas de un elemento a otro, y que como se vio en los antecedentes, es un tema que no se ha tratado mucho y que es de suma importancia para lograr que los reforzamientos funcionen correctamente; por esta razón, y contrario a las investigaciones ya realizadas, los ensayos en este proyecto se realizaron sin carga axial en los elementos, considerando que este es el caso más crítico para los sistemas de anclaje, además de que en las edificaciones de uno y dos pisos, a las cuales aplicarían los resultados de esta investigación, la carga axial en sus elementos es baja. Finalmente, con el fin de estudiar el comportamiento a corte y flexión en muros de mampostería reforzados con materiales compuestos se utilizaron dos relaciones de esbeltez, una de 1.54 (flexión) y otra de 0.77 (corte).

3. Materiales

En este capítulo se presenta una descripción general de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que se utilizaron en la presente investigación. Estos incluyen las unidades de mampostería, el mortero de pega y los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) con sus respectivas resinas de instalación.

3.1 Unidades de mampostería

Las unidades de mampostería son elementos de colocación manual, de características pétreas y estabilidad dimensional, que unidas con mortero configura el muro de mampostería (NSR-10, pp. D-12, Tomo 2). A continuación se describen algunas propiedades físicas y mecánicas de las unidades de mampostería.

3.1.1 Propiedades físicas

- *Tipos de unidades*

Las unidades de mampostería se clasifican de acuerdo con su materia prima, sus perforaciones y su uso estructural. En la primera clasificación se encuentran unidades de concreto, de arcilla, sílico – calcáreas y de piedra; en la segunda clasificación están las unidades de perforación horizontal (utilizadas en esta investigación), que se colocan en el muro asentadas sobre la cara que no tiene huecos; las unidades de perforación vertical, que se colocan en el muro asentadas sobre la cara que tiene los huecos y finalmente las unidades macizas, que no tienen perforaciones, o si las tienen, no superan en 25% el total de su volumen. En la tercera clasificación y aceptadas por el NSR – 10, las unidades se

pueden utilizar para conformar mampostería de muros diafragma, confinada, reforzada, parcialmente reforzada, cavidad reforzada o reforzada exteriormente. Las unidades de perforación horizontal se limitan únicamente a los muros de mampostería confinados, de cavidad reforzada y reforzados exteriormente (Molano, 2012, pp. 241-243). La Figura 3-1 muestra las diferentes unidades de mampostería descritas anteriormente en material de arcilla, las cuales en el medio colombiano producen diferentes empresas bajo distintas referencias.

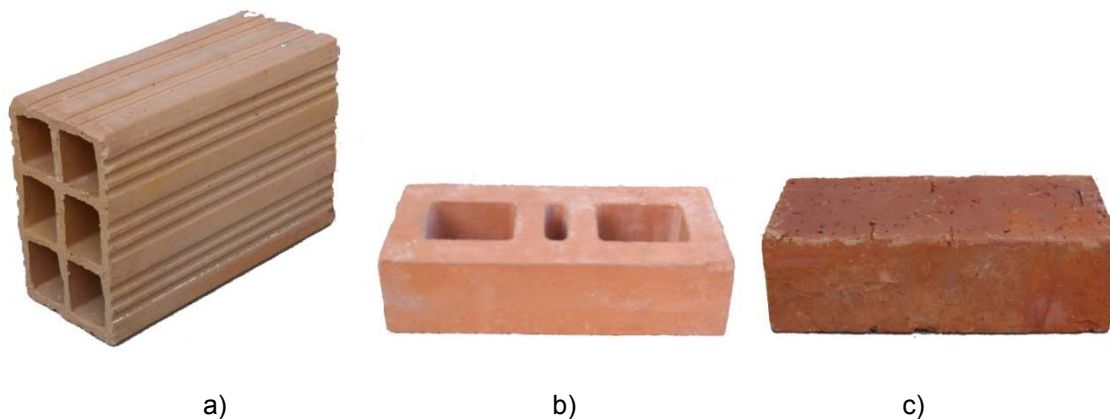


Figura 3-1 Tipos de unidades de mampostería

a) Unidades de perforación Horizontal (PH), b) Unidades de perforación vertical (PV), c) Unidades macizas.

Fuente: El autor

Otras de las propiedades físicas que se destacan son el volumen, que depende de las dimensiones y forma de la unidad y la densidad, que depende de la materia prima con que esté hecha la misma y puede variar entre 1680 kg/m^3 y 2200 kg/m^3 .

3.1.2 Propiedades mecánicas

- *Resistencia a compresión, f'_{cu} .*

La resistencia a la compresión de la unidad de mampostería es un parámetro utilizado como control de calidad de los diferentes procesos que intervienen en su fabricación, así como para determinar la resistencia a la compresión del conjunto de la mampostería f'_m (Takeuchi, 2007a, p. 25)

La resistencia a la compresión de la unidad de mampostería, f_{cu} se obtiene al dividir la máxima carga de compresión, sobre el área de aplicación de la carga de la unidad ensayada. La Tabla 3-1 muestra los valores mínimos de resistencia a la compresión que deben tener las unidades de mampostería.

Tabla 3-1 Valores mínimos de resistencia a la compresión, f_{cu} para las unidades de mampostería.
Fuente: Tomado de NTC 4205-1 Tabla 3. p. 7.

Tipo de Unidad	Promedio 5 Unidades (MPa)	Unidad (MPa)
PH	5,0	3,5
PV ^A	18,0	15,0
Macizo	20,0	15,0

^A Corresponde a la resistencia neta mínima a la compresión.

- Absorción

La absorción es la cantidad de agua que una unidad de mampostería puede absorber y retener en sus poros. Esta propiedad es muy importante en cuanto a la durabilidad de la mampostería; unidades con absorción alta pueden sufrir cambios volumétricos que puede afectar la configuración de la mampostería. La Tabla 3-2 muestra los porcentajes máximos de absorción (inmersión en agua fría durante 24 horas) que deben tener las unidades de mampostería.

Tabla 3-2 Valores máximos de absorción para las unidades de mampostería.
Fuente: Tomado de NTC 4205-1 Tabla 2. p. 7.

Tipo de Unidad	Promedio 5 Unidades (%)	Unidad (%)
PH	13	16
PV	13	16
Macizo	13	16

3.2 Mortero de pega

El mortero de pega es una mezcla plástica de materiales cementantes, agregado fino y agua, usado para unir las unidades de mampostería. Deben cumplir con parámetros físicos y mecánicos en estado fresco, como la manejabilidad, fluidez, retención de agua, consistencia, entre otros; y en estado endurecido, con la adherencia, resistencia a la compresión, durabilidad, entre otros (Molano, 2012, p. 62). A continuación se describen algunas propiedades en estado fresco y endurecido del mortero de pega

3.2.1 Propiedades en estado fresco

- *Fluidez*

La fluidez de una mezcla de mortero está relacionada con la manejabilidad y trabajabilidad del mismo. Esta manejabilidad depende de la dosificación de cada uno de los componentes conforman la mezcla, la fluidez del mortero en el ensayo del laboratorio debe estar entre 105% y 125% dependiendo del tipo de mortero (ver Tabla 3-4). El ensayo se hace midiendo el aumento porcentual del diámetro de un tronco de cono de mortero en estado fresco que se ubica en una superficie llamada mesa de flujo la cual se levanta una altura de 13 mm durante 25 veces en 15 segundos.

Tabla 3-3 Clasificación de morteros de pega por propiedad o proporción.

Fuente: Tomado de NSR – 10 Tabla D.3.4 – 1, p. D – 14.

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la compresión f_{cp} MPa.	Flujo en (%)	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal Hidratada	Cemento para Mampostería	Arena/Material Cementante	
							Mín.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.50
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.00
				1	no aplica	1	2.25	2.50
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.50
				0.5	no aplica	1	2.50	3.00
N	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.50
				0	no aplica	1	3.00	4.00

3.2.2 Propiedades en estado endurecido

- *Resistencia a compresión f'_{cp} .*

La resistencia a la compresión se utiliza como parámetro fundamental para definir el tipo de mortero a utilizar (ver Tabla 3-4). De este valor también depende la resistencia a compresión y el comportamiento de la mampostería. Para su ensayo se elaboran cubos de 50 mm de lado o cilindros de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura y se someten a compresión axial hasta a la falla. Su valor se obtiene de dividir la carga máxima entre el área de la sección transversal utilizada en la prueba. La resistencia a la compresión depende de la relación agua/cemento valor con el cual es posible dosificar los demás componentes de la mezcla.

3.3 Polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP)

Los polímeros reforzados con fibra (FRP por sus siglas en inglés) son un material compuesto por una combinación de una resina sintética y una fibra sintética. Las más usadas son la resina epóxica y las fibras de carbono, vidrio y aramida. Dependiendo de la fibra que se utilice, el material compuesto se denomina CFRP, GFRP y AFRP respectivamente. Para fines de la presente investigación, la fibra utilizada fue la de carbono. Los tejidos unidireccionales de este material son de alta resistencia y módulo elástico. A continuación se presentan las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de carbono en general y puntualmente la utilizada en esta investigación.

3.3.1 Propiedades físicas

Se destacan las siguientes propiedades físicas de los polímeros reforzados con fibra de carbono (ACI 440-7R, pp. 7-8), (Sika Colombia S.A., 2012).

- Densidad: Oscila entre 1.5 a 1.8 g/cm³, es decir, entre 4.3 a 5.2 veces menos que el acero, material que es muy convencional para realizar reforzamientos de estructuras. La densidad de la fibra utilizada fue de 1.8 g/cm³.

- Coeficiente de expansión térmico: Difieren en las direcciones longitudinal y transversal de la fibra. En la primera oscila entre -0.6×10^{-6} a $0.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ y en la segunda entre 22×10^{-6} a $50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. El valor negativo en el coeficiente de expansión térmico indica que el material se contrae con el incremento de la temperatura y se expande con la disminución de la misma.
- Masa: Los tejidos de fibra de carbono presentan masas que oscilan entre 300 y 610 g/m²; este último valor corresponde a la masa de la fibra utilizada.
- Espesores: Los tejidos de fibra de carbono presentan espesores de diseño que oscilan entre 0.17 a 0.34 mm; este último valor también corresponde al espesor de la fibra utilizada.

3.3.2 Propiedades mecánicas

Se destacan las siguientes propiedades mecánicas de los polímeros reforzados con fibra de carbono (ACI 440-7R, pp. 7-8), (Sika Colombia S.A., 2012):

- *Comportamiento a tensión:* este material tiene un comportamiento lineal y elástico en su relación esfuerzo - deformación hasta la falla, es decir, que no tiene ningún comportamiento plástico y al ser sometido a la sollicitación de tensión presenta una falla súbita. La resistencia a la tensión de esta fibra depende de muchos factores como son el tipo de fibra, la orientación, la cantidad, el método de fabricación, entre otros. El módulo de elasticidad debe ser calculado en un punto que corresponda a una deformación unitaria entre 0.003 y 0.006. Algunos valores que describen el comportamiento a tensión son: resistencia a la tensión de 4200 MPa, módulo elástico entre 160000 a 240000 MPa y elongación de rotura de 1.5%.
- *Comportamiento a compresión:* no se recomienda utilizar este material como reforzamiento a compresión debido a la falta de ensayos frente a esta sollicitación. Algunos estudios han demostrado que la resistencia a compresión es más baja que la resistencia a la tensión, así como el módulo de elasticidad.
- *Flujo plástico (Creep):* los polímeros reforzados con fibras sometidos a una carga de tracción constante en el tiempo pueden fallar de repente después de un período denominado tiempo de resistencia, el cual puede disminuir si a eso se le adicionan

condiciones ambientales adversas como las altas temperaturas, la radiación ultravioleta, los ciclos de congelamiento y descongelamiento, entre otros. Investigaciones han demostrado que las fibras de carbono son las menos susceptibles a este tipo de fenómenos.

- *Fatiga*: en reforzamientos con materiales compuestos la fatiga no es muy común en las estructuras de mampostería, ya que en la mayoría de las veces, estos sistemas están diseñados para soportar cargas no comunes (como los sismos) así que los ciclos de carga serán bajos a lo largo de su vida de servicio.

3.4 Resinas

Este tipo de materiales se utilizan para instalar los sistemas de FRP, ya sea pegando el refuerzo a los elementos estructurales, impregnando los tejidos de fibras para darles el mismo fin o llenando las ranuras de los sistemas NSM que permitan la colocación de las barras de FRP. Las resinas epóxicas son las más utilizadas y presentan las siguientes características (ACI 440-7R, p. 6):

- Compatible con la adhesión a la fibra de refuerzo.
- Compatible con la adhesión a la mampostería.
- Resistente a condiciones ambientales como las altas temperaturas, humedad y demás productos o químicos asociados con la mampostería expuesta.
- Es manejable durante la instalación.
- Desarrollo rápido de las propiedades mecánicas para el sistema de FRP.

Algunas resinas de impregnación como la Sikadur® – 301 presenta las siguientes propiedades mecánicas (Sika Colombia S.A., 2012):

Resistencia a tensión a 7 días: 52 MPa.

Módulo de elasticidad: 2000 MPa.

Elongación de rotura: 3.5%

Resistencia a flexión a 7 días: 90 MPa.

Resistencia a compresión a 7 días: 96 MPa.

Módulo en compresión: 1725 MPa.

3.5 Mampostería

3.5.1 Propiedades mecánicas

- *Resistencia a compresión, f'_m .*

La resistencia a la compresión de la mampostería es un parámetro muy importante para diseñar estructuras de mampostería. Al estar conformada por diferentes materiales, la resistencia a la compresión depende de las unidades de mampostería y los morteros de pega y/o relleno. Además de estos, la mano de obra, técnicas constructivas y las condiciones de ambiente también son parámetros que influyen en la determinación de esta propiedad. Para evaluar la resistencia a la compresión de la mampostería el NSR – 10 (NSR-10, pp. D-17, Tomo 2) reconoce 3 métodos: por medio de experimentación, de registros históricos y de las calidades individuales de los materiales que la componen. A continuación se explica cada uno de ellos.

Experimentación: En este método es necesario construir especímenes de prueba denominados prismas o muretes, que deben tener una altura mínima de 300 mm y una relación altura/espesor entre 1.5 y 5.0. Dependiendo del número de prismas ensayados, el valor de f'_m será:

- Más de 30 ensayos: $f'_m = 85\%$ del promedio de los ensayos.
- Entre 10 y 30 ensayos: $f'_m = 80\%$ del promedio de los ensayos.
- Entre 3 y 10 ensayos: $f'_m = 75\%$ del promedio de los ensayos.

Registros históricos: En este método los registros hacen referencia a ensayos sobre muretes de obras anteriores construidos con los mismos o materiales y mano de obra que se utilizarán en la nueva construcción. Dependiendo del número de registros que se tengan, el valor de f'_m será:

- Más de 30 ensayos: $f'_m = 75\%$ del promedio de los ensayos del registro.
- Entre 10 y 30 ensayos: $f'_m = 70\%$ del promedio de los ensayos del registro.
- Menos de 10 ensayos: No se pueden utilizar los registros para determinar f'_m .

Calidades individuales de los materiales: En este método el valor de f'_m se determina con base en la correlación de la calidad de los materiales individuales, a través de la Ecuación 3.1:

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

$$f'_m = 0.75R_m$$

Ecuación 3-1

Donde

h = Altura de la unidad de mampostería (mm)

f'_{cu} = resistencia a compresión de la unidad de mampostería (MPa)

f'_{cp} = resistencia a compresión del mortero de pega (MPa)

k_p = factor de corrección por absorción de la unidad. 0.8 para unidad de arcilla; 1.4 para unidad de concreto.

- *Módulo de elasticidad, E_m .*

El valor para el módulo de elasticidad de la mampostería se debe establecer por medio de ensayos de laboratorio de muretes o prismas, calculando en la curva esfuerzo-deformación obtenida en el ensayo, la pendiente de la secante entre el 5% de f'_m y el 33% de f'_m (NSR-10, pp. D-34, Tomo 2)

Estos valores están en la porción lineal de la curva esfuerzo - deformación de la mampostería e ignora la parte más baja (debajo del 5%), donde se presenta un acomodamiento del espécimen durante la fase inicial de carga del ensayo a compresión de los prismas (Takeuchi, 2007b, p. 106)

Cuando no se tienen datos experimentales, el NSR – 10 en D.5.2.1 establece los siguientes valores de módulo de elasticidad de la mampostería.

Para mampostería en concreto:

$$E_m = 900f'_m \leq 20000 \text{ MPa}$$

Ecuación 3-2

Para mampostería en arcilla:

$$E_m = 750f'_m \leq 20000 \text{ MPa}$$

Ecuación 3-3

- *Módulo de cortante, G_m .*

El módulo de cortante de la mampostería se determina experimentalmente como la pendiente de la recta inicial de la curva de esfuerzo cortante – deformación. Cuando no se tienen datos experimentales el NSR – 10 en D.5.2.2 establece que la relación entre el módulo de cortante y el de elasticidad es de 0.40.

$$G_m = 0.40E_m$$

Ecuación 3-4

- *Relación de Poisson*

A partir de la relación entre los módulos de cortante y elasticidad y la expresión mostrada en la Ecuación 3-4 es posible determinar la relación de Poisson de la mampostería.

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \mu)}$$

Ecuación 3-5

$$0.4E_m = \frac{E_m}{2(1 + \mu)}$$

$$\mu = 0.25$$

- *Resistencia a la tracción*

Cuando la mampostería es sometida a solicitaciones horizontales en su plano se producen esfuerzos deflexión que combinan esfuerzos por compresión y tracción en el elemento.

Aunque una de las suposiciones de diseño de mampostería en el NSR – 10, es considerar que la mampostería no resiste esfuerzos por tracción (NSR-10, pp. D-38, Tomo 2) es posible determinar esta resistencia realizando ensayos de tracción diagonal. En este ensayo, se ensaya a compresión un prisma de mampostería en posición diagonal; la resistencia a la tracción diagonal, será la relación entre la carga máxima soportada por el prisma y el área que resiste el corte, es decir, la diagonal del prisma por el espesor del mismo.

Con la descripción general de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que se utilizaron en esta investigación, y que incluyeron las unidades de mampostería, el mortero de pega y los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) con sus respectivas resinas para su instalación, se pasa en el próximo capítulo al desarrollo del programa experimental, con la elaboración y posterior ensayo de los especímenes de prueba.

4. Programa experimental

4.1 Metodología

Para alcanzar el desarrollo de los objetivos propuestos y cubrir el alcance de la presente investigación fue necesario desarrollar un programa experimental que consistió en la elaboración de especímenes de prueba que fueron ensayados en el laboratorio y permitieron conocer el comportamiento, ante carga cíclica en el plano, de la mampostería no estructural cuando es reforzada con materiales compuestos de fibra de carbono.

Inicialmente se presentan las variables del estudio experimental y se realiza una caracterización individual de los materiales usados en el proyecto. En el programa experimental se construyeron muros a escala real utilizando bloque de perforación horizontal, conocido tradicionalmente como bloque No 5., y se ensayaron ante carga lateral dinámica y estática en el plano del muro. Primero se realizaron ensayos estáticos (monotónicos) a partir de los cuales se pudo establecer el protocolo de carga para realizar los ensayos dinámicos.

4.2 Variables del estudio experimental

A continuación en la Tabla 4-1 se definen las variables referentes a las configuraciones de reforzamiento utilizadas así como las dimensiones de los elementos elaborados que se tuvieron en cuenta para el estudio experimental.

Tabla 4-1 Variables del estudio experimental

Elemento	Dimensiones especímenes (m)			Relación Alto/Largo	Configuración de reforzamiento	Tipo de ensayo	Cantidad
	Alto	Largo	Espesor				
Muro Largo	1,90	2,47	0,12	0,77	Sin Refuerzo	Estático	1
Muro Corto	1,90	1,23	0,12	1,54	Sin Refuerzo	Estático	1
Muro Largo	1,90	2,47	0,12	0,77	Diagonal	Estático	4
Muro Corto	1,90	1,23	0,12	1,54	Grilla	Estático	2
Muro Largo	1,90	2,47	0,12	0,77	Diagonal	Dinámico	2
Muro Largo	1,90	2,47	0,12	0,77	Grilla	Dinámico	1
Muro Corto	1,90	1,23	0,12	1,54	Diagonal	Dinámico	2
Muro Corto	1,90	1,23	0,12	1,54	Grilla	Dinámico	1

El tipo de ladrillo, mortero de pega y tejido de fibra de carbono utilizado, no se consideraron como variables, ya que todos los especímenes de prueba fueron elaborados con los mismos materiales bajo las mismas condiciones constructivas; los muros denominados largos (esbeltez de 0.77) se realizaron con el fin de estudiar el comportamiento a flexión y corte y los muros denominados cortos (esbeltez de 1.54) para estudiar el comportamiento a flexión, principalmente.

4.3 Caracterización de materiales

Para conocer las propiedades mecánicas de los materiales individuales que componen los especímenes de prueba se realizaron ensayos sobre las unidades de arcilla, el mortero de pega y el concreto. Los ensayos incluyeron resistencia a la compresión y absorción en unidades, resistencia a la compresión y fluidez en morteros, resistencia a la compresión en cilindros de mortero y concreto así como resistencia a la compresión en muretes. La Tabla 4-2 describe los ensayos realizados sobre los materiales individuales.

Tabla 4-2 Resumen de ensayos en materiales individuales

Ensayo	Dimensiones especímenes (mm)			Cantidad
	Alto	Largo	Ancho/Diámetro	
Absorción en unidades	200	300	120	5
Compresión en unidades	200	300	120	5
Fluidez en morteros	-	-	-	6
Compresión en cubos de mortero	50	50	50	24
Compresión en cilindros de mortero	100	-	50	15
Compresión en cilindros de concreto	200	-	100	13
Compresión en cilindros de concreto	150	-	75	8
Compresión en prismas (Muretes)	410	300	120	3

4.3.1 Mampostería

Las unidades de mampostería de arcilla de bloque No. 5 estándar, de dimensiones 12 x 20 x 30 cm (ver Figura 4-1), utilizadas en esta investigación, fueron suministradas por la **LADRILLERA PRISMA S.A.** quien se mostró interesada en hacer parte de este estudio.

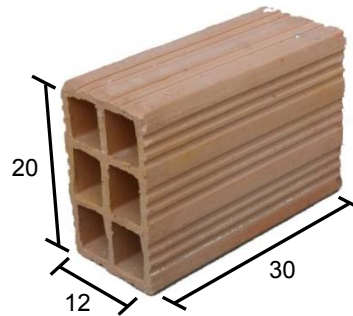


Figura 4-1 Dimensiones del bloque No. 5 estándar utilizados.

Fuente: El autor

A continuación se realiza una descripción de la realización de los ensayos de compresión y absorción en las unidades de mampostería y del ensayo de compresión en muretes (prismas)

- *Ensayo de compresión en unidades*

Para el ensayo de compresión en las unidades de mampostería utilizadas en el proyecto se siguió el procedimiento establecido en la norma (NTC 4017). La Figura 4-2 presenta el montaje del ensayo de resistencia a la compresión en las unidades.

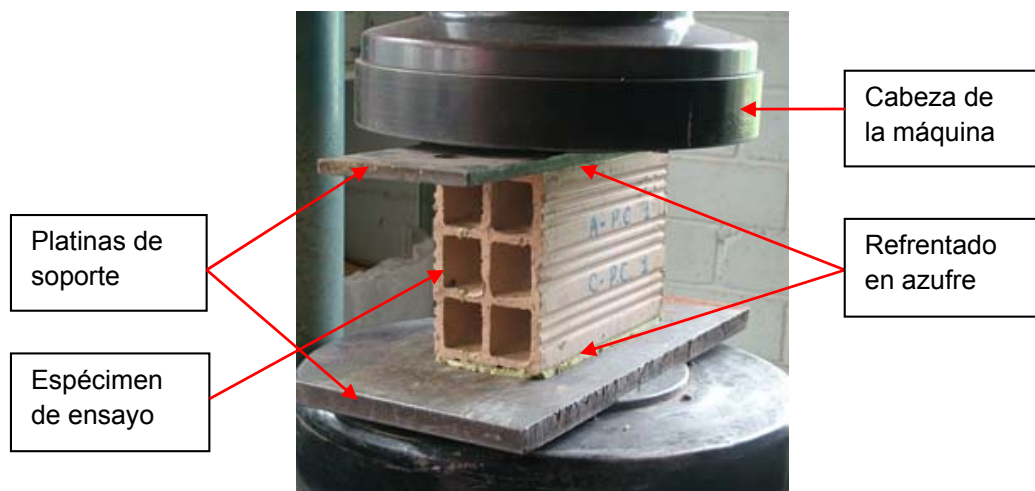


Figura 4-2 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en unidades de mampostería.

Fuente: El autor

- *Ensayo de Absorción en unidades*

Para el ensayo de absorción en las unidades de mampostería utilizadas en el proyecto se siguió el procedimiento de inmersión durante 24 horas establecido en la norma (NTC 4017).

- *Ensayo de compresión en muretes (prismas)*

Para el ensayo de compresión en muretes, con el cual se pudieron determinar las propiedades mecánicas de la mampostería, se siguió el procedimiento establecido en la norma (NTC 3495). La Figura 4-3 presenta el montaje del ensayo de resistencia a la compresión en muretes.

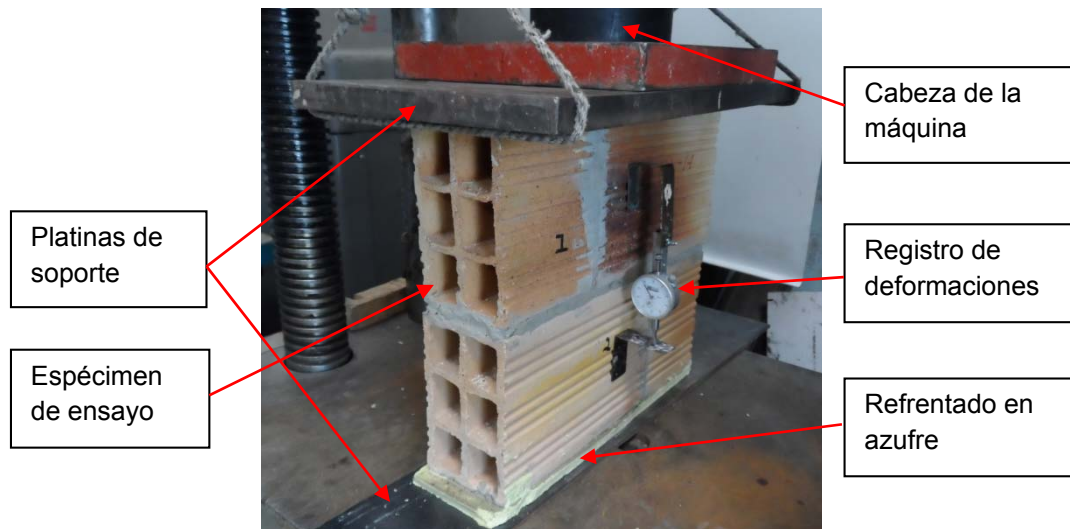


Figura 4-3 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en muretes.

Fuente: El autor

- *Ensayo de módulo de elasticidad de la mampostería.*

Para el ensayo del módulo de elasticidad de la mampostería, se tomó como base el procedimiento del ensayo de compresión en muretes y adicionalmente se realizaron lecturas de deformación (ver Figura 4-3) para el respectivo cálculo de las deformaciones unitarias y posterior realización del gráfico de σ vs ϵ .

4.3.2 Mortero de pega

Los muros elaborados para el estudio de esta investigación fueron construidos con un mortero tipo M de una resistencia a la compresión de 17,5 MPa y una fluidez entre 115 – 125%. A continuación se presenta una descripción de la realización de los ensayos al mortero.

- *Ensayo de compresión*

El ensayo de compresión se realizó sobre cubos de mortero, para determinar las proporciones de diseño de la mezcla de mortero para la construcción de los muros. Por otro lado, también se elaboraron cilindros de mortero para verificar la resistencia de los morteros utilizados en los muros construidos. Para el ensayo de compresión sobre cubos de mortero se siguió el procedimiento establecido en la norma (NTC 220). La Figura 4-4 muestra el montaje del ensayo de compresión en cubos de motero.

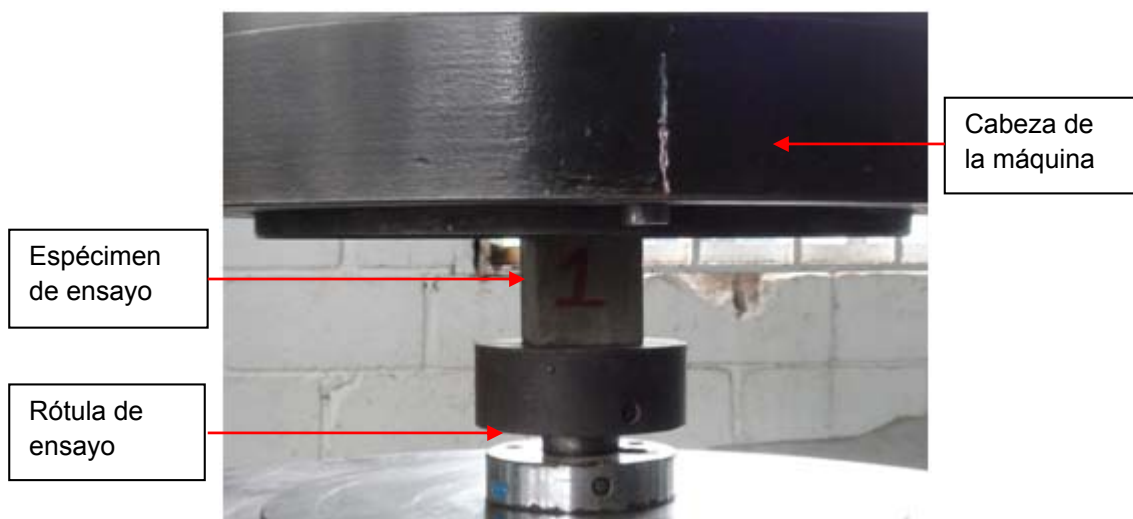


Figura 4-4 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cubos de mortero

Fuente: El autor

Para el ensayo de compresión sobre cilindros de mortero se siguió el procedimiento establecido en la norma (NTC-3546). La Figura 4-5 muestra el montaje del ensayo de compresión en cilindros de motero.

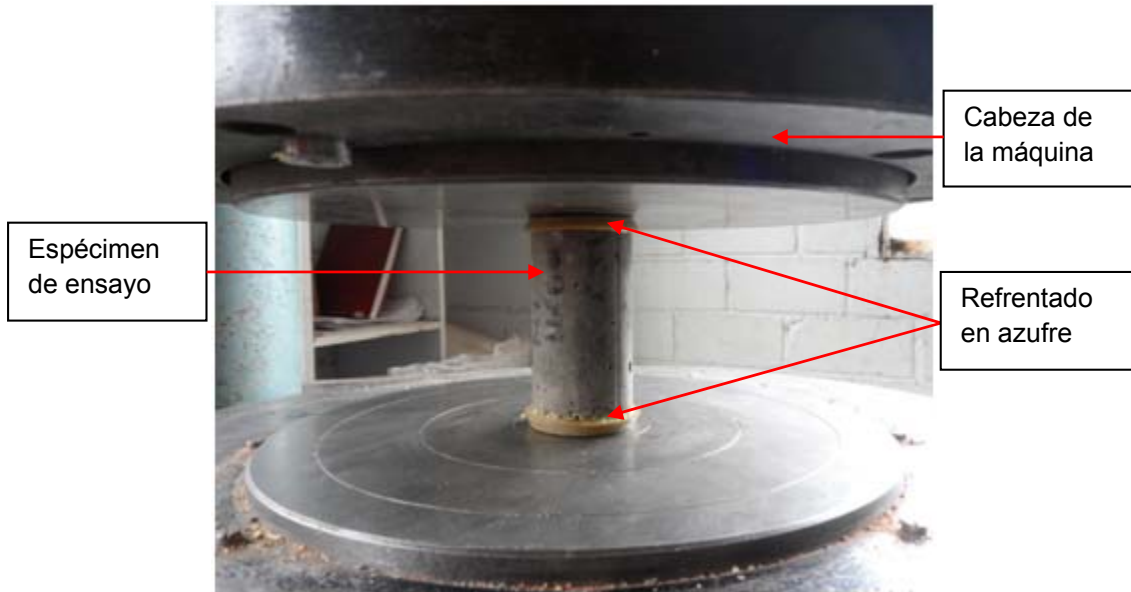


Figura 4-5 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de mortero
Fuente: El autor

- *Ensayo de fluidez*

Para el ensayo de fluidez en morteros se siguió el procedimiento establecido en la norma (NTC 111). La Figura 4-6 muestra el montaje del ensayo de fluidez en morteros.



Figura 4-6 Montaje del ensayo de fluidez en morteros
Fuente: El autor

4.3.3 Tejido de fibra de carbono

A los tejidos de fibra de carbono no se les realizó ningún ensayo para determinar las propiedades mecánicas del material, ya que se tomó como referencia, los valores reportados por el fabricante en las hojas técnicas de dicho material (Ver Anexo K). El tejido

utilizado para el desarrollo de este proyecto fue el SikaWrap 600C colocado con el adhesivo epóxico Sikadur®-301, ambos suministrados por la empresa **SIKA COLOMBIA S.A.**, quien se mostró interesada en hacer parte de esta investigación.

4.3.4 Concreto

Este material se utilizó para la construcción de las vigas de cimentación de los muros, las vigas de borde superior y los macizos utilizados en los sistemas de anclaje. Tuvo una resistencia de diseño a la compresión de 28 MPa. Aunque su comportamiento mecánico no hace parte directa del estudio de la presente investigación, se tomaron cilindros de prueba para verificar la resistencia a la compresión del material que conformó estos elementos de cimentación. A continuación se realiza una descripción de la realización del ensayo de compresión.

- *Ensayo de compresión*

Para el ensayo de compresión en cilindros de concreto se siguió el procedimiento establecido en la norma (NTC 673). La Figura 4-7 presenta el montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de concreto.



Figura 4-7 Montaje del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de concreto

Fuente: El autor

4.4 Proceso constructivo de los muros

4.4.1 Vigas de cimentación

Antes de la construcción de los muros se llevó a cabo la construcción de las vigas de cimentación que sirvieron de soporte a los mismos. Estos elementos fueron construidos con concreto de 28 MPa de resistencia a la compresión, reforzado con dos (2) barras de 1/2" arriba y abajo, junto con estribos de 3/8" separados cada 0.125 m (ver Figura 4-9). La Figura 4-8 presenta algunos pasos del proceso constructivo de las vigas de cimentación.



1) Ubicación del refuerzo dentro de la formaleta.

2) Colocación y vibrado del concreto



3) Producto final una vez fraguado y desencofrado

Figura 4-8 Proceso constructivo de las vigas de cimentación.

Fuente: El autor.

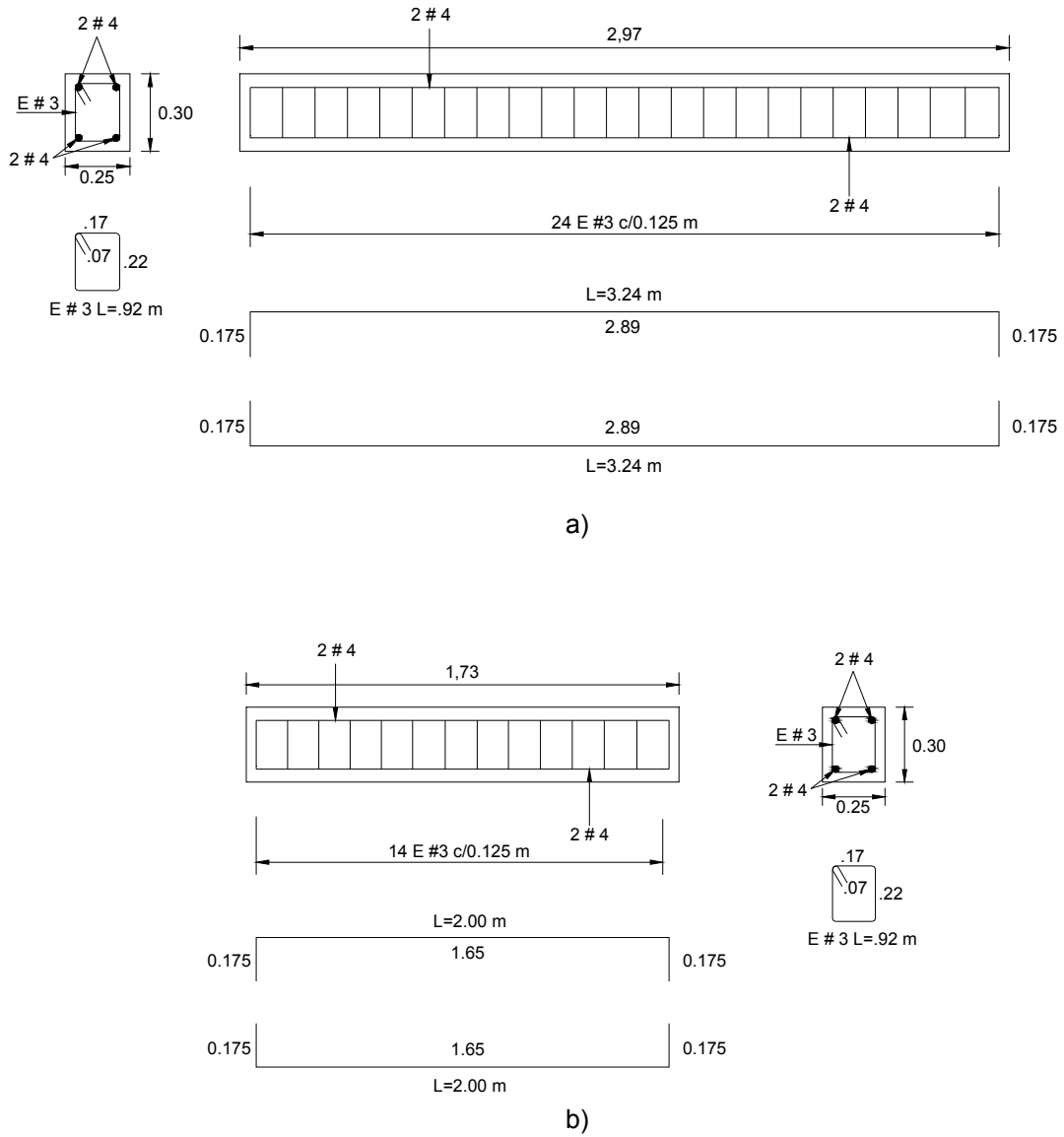


Figura 4-9 Dimensiones y refuerzo de las vigas de cimentación.
 a) Viga muro largo, b) Viga muro corto. Fuente: El autor.

4.4.2 Muros no reforzados

Para el proceso constructivo de los muros de prueba se siguen las prácticas y técnicas convencionales que se utilizan en el medio local para la construcción de este tipo de muros. A continuación se hace una breve descripción de este proceso (Manual AIS, pp. 1-27).

- Sobre la viga de cimentación se ubican los ladrillos que conformarán la primera hilada, en un primer momento sin usar mortero de pega para evitar posibles errores en el resto del muro, identificando en las esquinas de los muros unos ladrillos “guías”.
- Una vez se ha determinado la correcta ubicación de las unidades se procede a colocar la primera capa de mortero de pega sobre la parte superior de la viga de cimentación seguido de la colocación de la primera hilada de ladrillos verificando el alineamiento y el espesor de la junta de pega, que puede variar en 7 mm y 13 mm, tratando de buscar que sea siempre de 10 mm tanto vertical como horizontal.
- A medida que se empiecen a subir las hiladas, se debe garantizar una traba adecuada de los ladrillos evitando un aparejo petaca.
- Es importante que durante el proceso constructivo se verifique, además del alineamiento, la verticalidad del muro. Para esto, el uso de la plomada y los hilos guías es fundamental. La primera, al dejarse caer libremente sobre el muro debe rozar levemente la superficie del mismo. Si queda muy separada, es porque el muro está inclinado y se debe rectificar su verticalidad. Este procedimiento también puede realizarse utilizando niveles de burbuja.
- Vale la pena aclarar que todos los ajustes deben hacerse antes de que el mortero empiece a tener algún grado de fraguado que dificulte la maniobrabilidad de alguna de estas labores.

En la Figura 4-10 se presenta una secuencia del proceso constructivo de los muros no reforzados y en la Figura 4-11 el resultado final de su construcción.



1) Ubicación de la primera hilada sobre viga de cimentación sin mortero de pega.



2) Ladrillos guías en las esquinas del muro.



3) Colocación de la primera capa de mortero de pega seguida de la primera hilada de ladrillos.



4) Verificación de la verticalidad del muro con la ayuda de un nivel de burbuja.



5) Traba adecuada en los muros, evitando aparejo petaca.

Figura 4-10 Secuencia del proceso constructivo de los muros no reforzados.
Fuente: El autor.



a)



b)

Figura 4-11 Muros sin reforzar al finalizar su construcción.
a) Muro corto, b) Muro largo. Fuente: El autor.

Es importante resaltar que durante el proceso constructivo de los muros, se tomaron muestras del mortero de pega usado en obra, para la verificación de la resistencia de diseño.

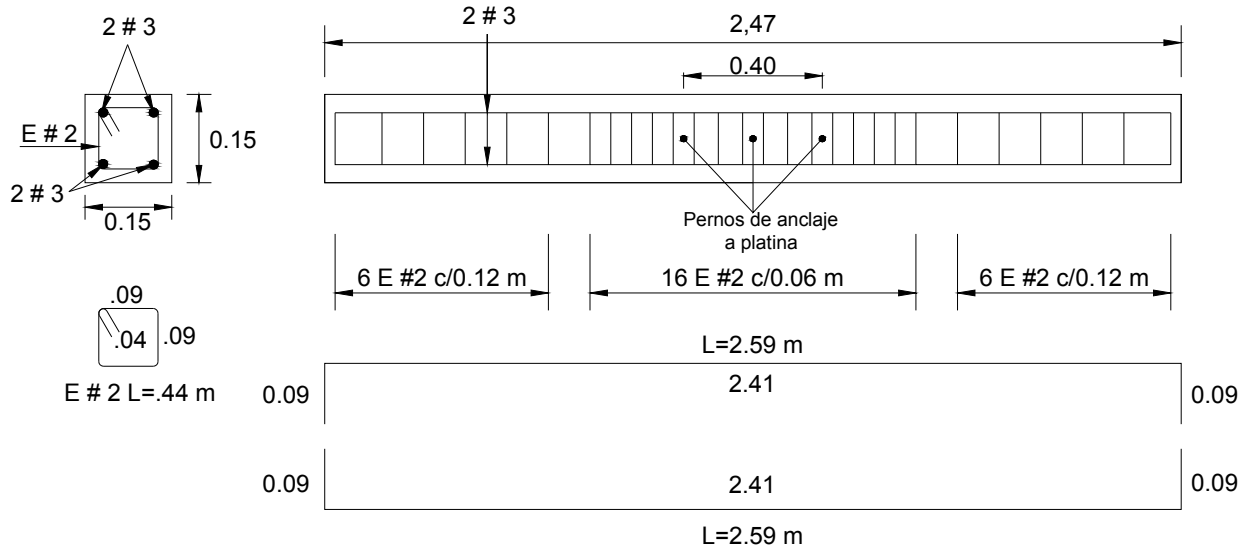
4.4.3 Vigas de borde superior

Las vigas de borde superior fueron construidas en la parte alta de los muros y sirvieron de soporte para el montaje y posterior realización de los ensayos estáticos (monotónicos) y dinámicos en el plano. Estos elementos fueron construidos en concreto de 28 MPa de resistencia a la compresión, reforzado con dos (2) barras de 3/8" arriba y abajo, junto con estribos de 1/4" (ver Figura 4-13). La Figura 4-12 presenta los pasos del proceso constructivo de estos elementos.

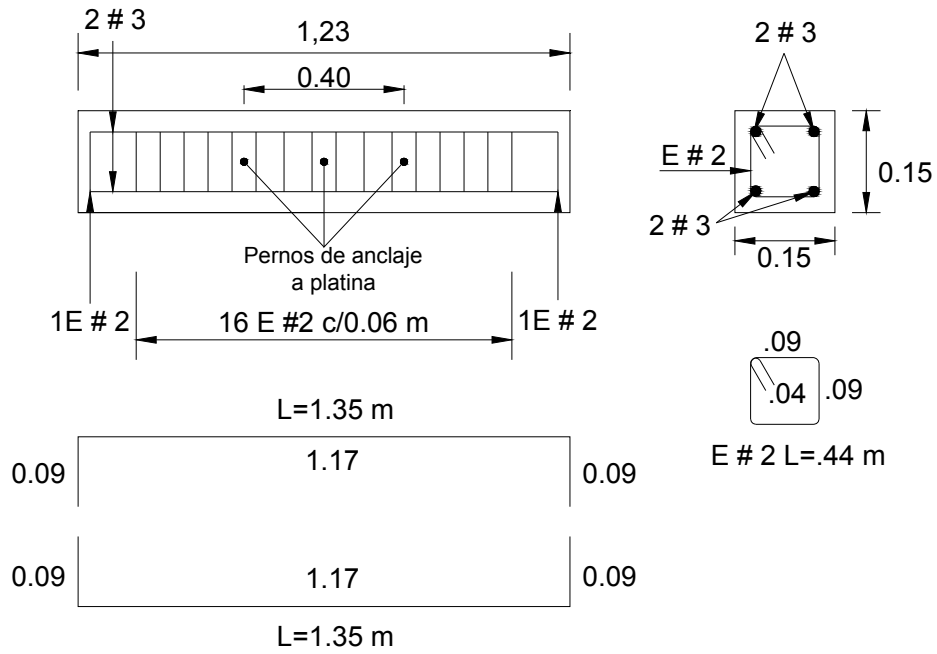


Figura 4-12 Proceso constructivo de las vigas de borde superior.

Fuente: El autor.



a)



b)

Figura 4-13 Dimensiones y refuerzo de las vigas de borde superior.
 a) Viga muro largo, b) Viga muro corto. Fuente: El autor.

4.4.4 Muros reforzados

Los muros reforzados se construyeron, en su primera etapa, de la misma manera como se construyeron los muros no reforzados, utilizando las mismas técnicas, procesos constructivos y materiales. La singularidad de estos, se presentó en la colocación del material de refuerzo, en este caso, los tejidos de fibra de carbono (CFRP). El proceso constructivo que se siguió, se presenta en la Figura 4-14.



1) Cimbrar en los muros la ubicación de los tejidos



Componente B

Componente A

Arena

Mezclado

2) Realizar la mezcla para la preparación de la superficie. En la mezcla se utilizó una unidad del componente B, tres unidades del componente A y ocho unidades de arena de río tamizadas por el tamiz No. 16.



3) Colocar la mezcla para la preparación de la superficie antes de poner los tejidos



Muros una vez finalizada la preparación de la superficie

4) El siguiente paso que se realiza en el proceso constructivo del reforzamiento de los muros es el sistema de anclaje que se va a utilizar entre el muro de mampostería y la cimentación. Esta labor se considera de vital importancia para garantizar el adecuado funcionamiento del elemento frente a las solicitaciones a las que estará sometido. Por esta razón, este procedimiento se explica con mayor detalle en el numeral 4.4.5 del presente documento. A continuación se procede a explicar la colocación de los tejidos de fibra de carbono.



5) Sobre una superficie limpia, plana y sin rugosidades o hendiduras, colocar el tejido de fibra para proceder a realizar los cortes según el diseño y la geometría del elemento.

6) A medida que se van realizando los cortes de las tiras, estas se van enrollando para evitar que se contaminen de polvo u otras partículas.



Componente B

Componente A



Mezclado

7) Realizar la mezcla para la colocación de los tejidos. En la mezcla se utilizó una unidad del componente B y tres unidades del componente A



8) Sobre una superficie limpia, plana y sin rugosidades o hendiduras, colocar la tira de tejido de fibra, previamente cortada, y aplicar la mezcla por ambos lados con la ayuda de un rodillo. 9) Enrollar nuevamente la tira impregnada de la mezcla para proceder a colocarla sobre el muro.



10) Antes de colocar la fibra en el muro se debe aplicar un poco de la mezcla sobre la superficie preparada por donde estará el tejido.

11) Si el tejido estará en contacto con superficies rugosas o ásperas, estas deben ser pulidas hasta dejar una superficie suave, para evitar que la fibra pueda perder efectividad.



12) Colocar el tejido sobre el muro. Para esto se va desenrollando lentamente la tira y se va asentando sobre la superficie con ayuda de las manos.



13) Colocado el tejido se procede a aplicar otra capa de epóxico para dejarlo bien impregnado.

14) Finalmente, con un rodillo percolador se procede a pasarlo varias veces sobre el tejido para eliminar todos los vacíos o burbujas que hayan quedado.

Figura 4-14 Secuencia del proceso constructivo del reforzamiento de los muros.

Fuente: El autor.

A continuación se presentan los muros una vez terminado el proceso de reforzamiento. En la Figura 4-15 se presentan con el sistema de anclaje No. 1 y en la Figura 4-16 con el sistema de anclaje No. 4 (ver numeral 4.4.5).



a)



b)

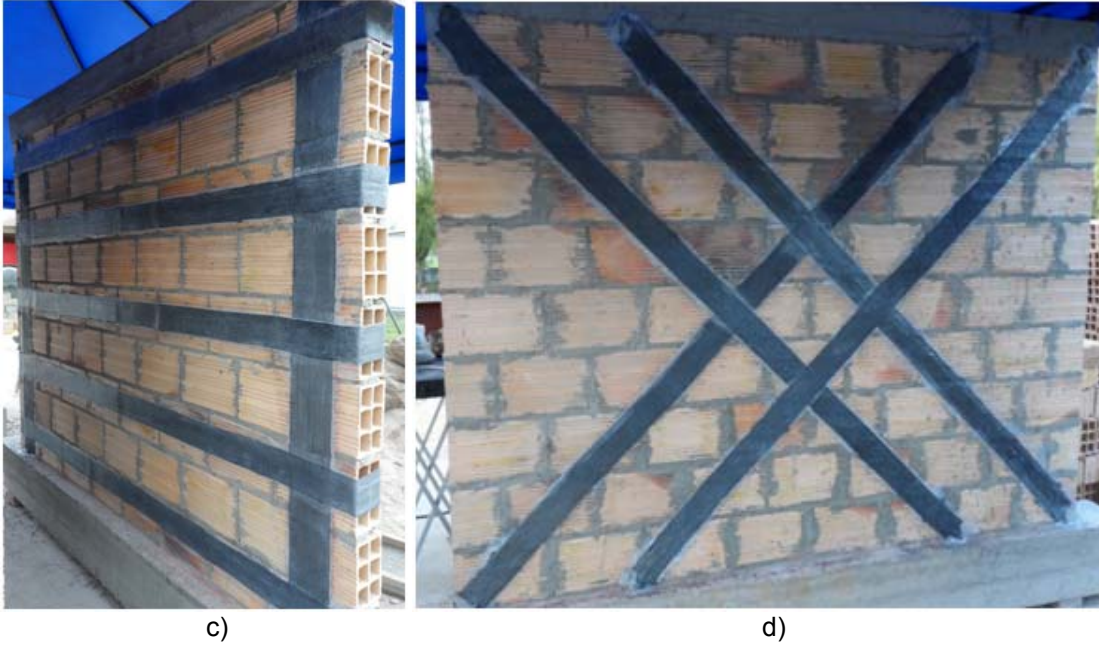
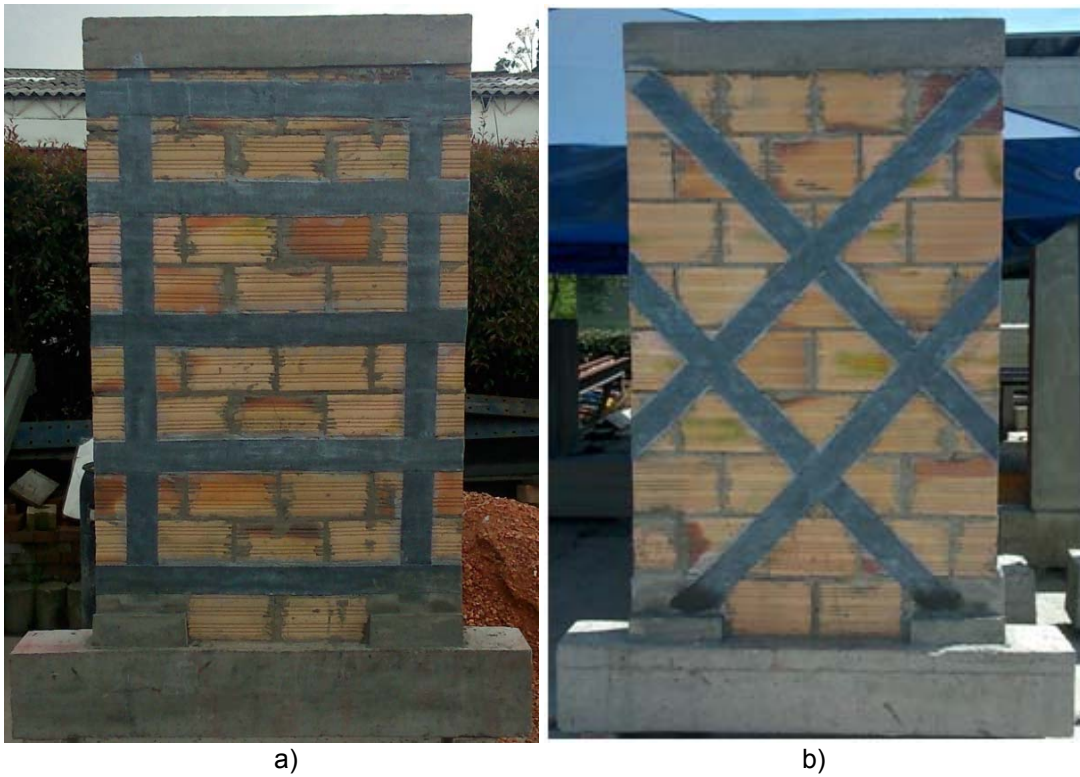


Figura 4-15 Muros reforzados con sistema de anclaje No 1.
a) Muro corto en grilla, b) Muro corto en diagonal, c) Muro largo en grilla
d) Muro largo en diagonal. Fuente: El autor.



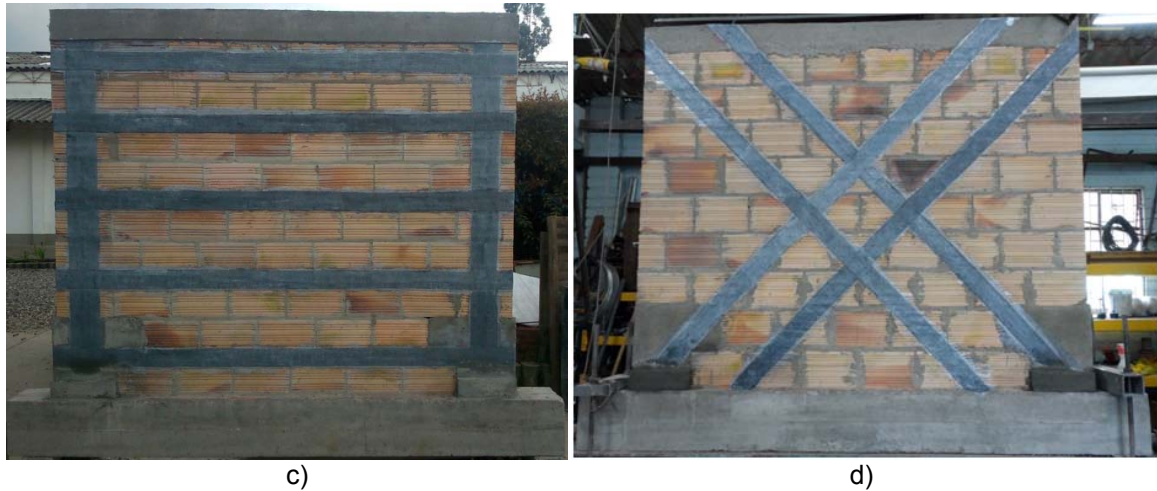


Figura 4-16 Muros reforzados con sistema de anclaje No 4.
a) Muro corto en grilla, b) Muro largo en grilla c) Muro corto en diagonal,
d) Muro largo en diagonal. Fuente: El autor.

4.4.5 Sistemas de anclaje

Los anclajes de los elementos estructurales son puntos críticos desde el punto de vista del comportamiento de la estructura; para garantizar que esta se comporte de manera monolítica a la hora de transferir las cargas, es fundamental que se preste atención a este aspecto.

Para el caso de este proyecto, el anclaje que se necesitaba para obtener un comportamiento de muro de corte debía tener continuidad o monolitismo con la viga de cimentación. Para lograr que el material de refuerzo del muro, en este caso la fibra de carbono, y el muro en sí mismo, trabajaran adecuadamente frente a las solicitaciones a las que estarían sometidos, era de vital importancia que el muro estuviera vinculado a su cimentación y no fuera a presentarse una falla en el anclaje, antes de que fallara la fibra y el muro en conjunto, que era el objeto de la investigación.

Para lograr lo anteriormente descrito, se estudiaron diferentes mecanismos de anclaje que permitieran escoger el sistema óptimo. Se estudiaron a lo largo de la investigación 4 opciones de anclaje que se explican a continuación.

- *Sistema de anclaje No. 1: Corbatines de FRP*

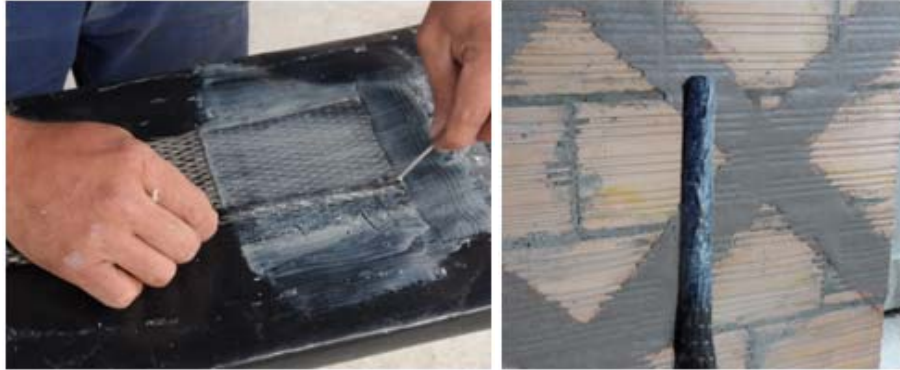
Los corbatines de FRP son tiras del mismo material de aproximadamente 30 cm de longitud y del ancho de la tira que se va a anclar. Este sistema de anclaje consiste en enrollar una parte de la longitud de la tira y anclarla en la cimentación con un adhesivo epóxico, en un orificio previamente abierto, una profundidad de 10 a 15 cm (30% a 50% de su longitud según la recomendación del fabricante de la fibra). Al resto de la tira que queda por fuera, se le quita un hilo que tiene el tejido en su costura y se deshilacha la fibra completamente. El siguiente paso es adherir esa fibra deshilachada al muro de mampostería y sobre la misma, pegar la tira completa como se explicó en el paso 12 de la Figura 4-14. De esta manera se realiza la vinculación del muro y el refuerzo de FRP a la cimentación. La secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje con corbatines de FRP se presenta en la Figura 4-17.



1) Realizar las perforaciones con la ayuda de un taladro en los puntos de la viga de cimentación y de borde superior donde comienza y finaliza la tira de refuerzo. El diámetro de la perforación depende del diámetro resultante del corbatín cuando se enrolla.



2) Limpiar la perforación de cualquier partícula de polvo o residuo que pueda disminuir la capacidad del anclaje. Para esto se requiere de un compresor de aire y churruscos de limpieza preferiblemente de cerda metálica.

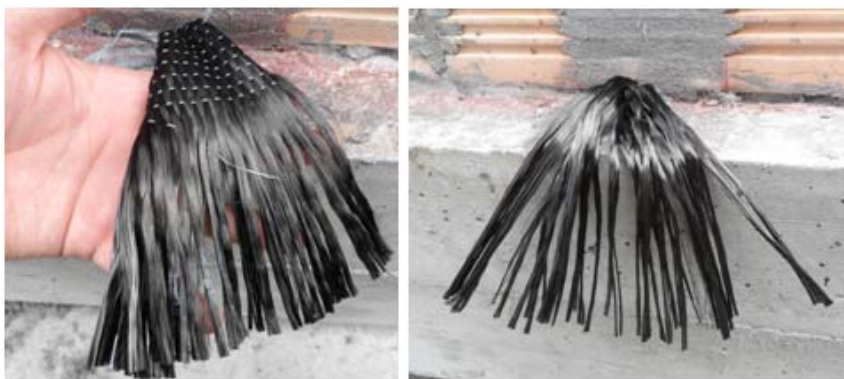


3) Aplicar el epóxico por ambos lados de la zona que se va a anclar e ir enrollando la tira hasta que quede lista para introducirla en la perforación.



4) Aplicar el adhesivo en la perforación.

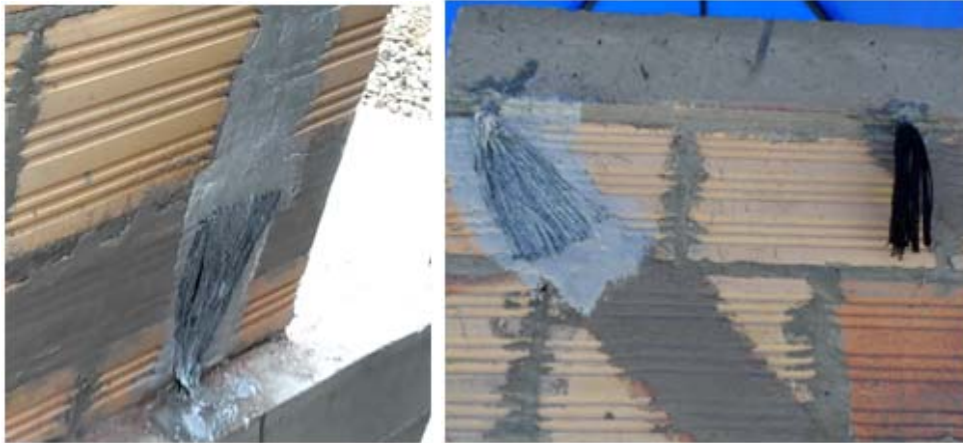
5) Introducir lentamente el corbatín de manera que se vaya sacando el aire presente dentro del orificio.



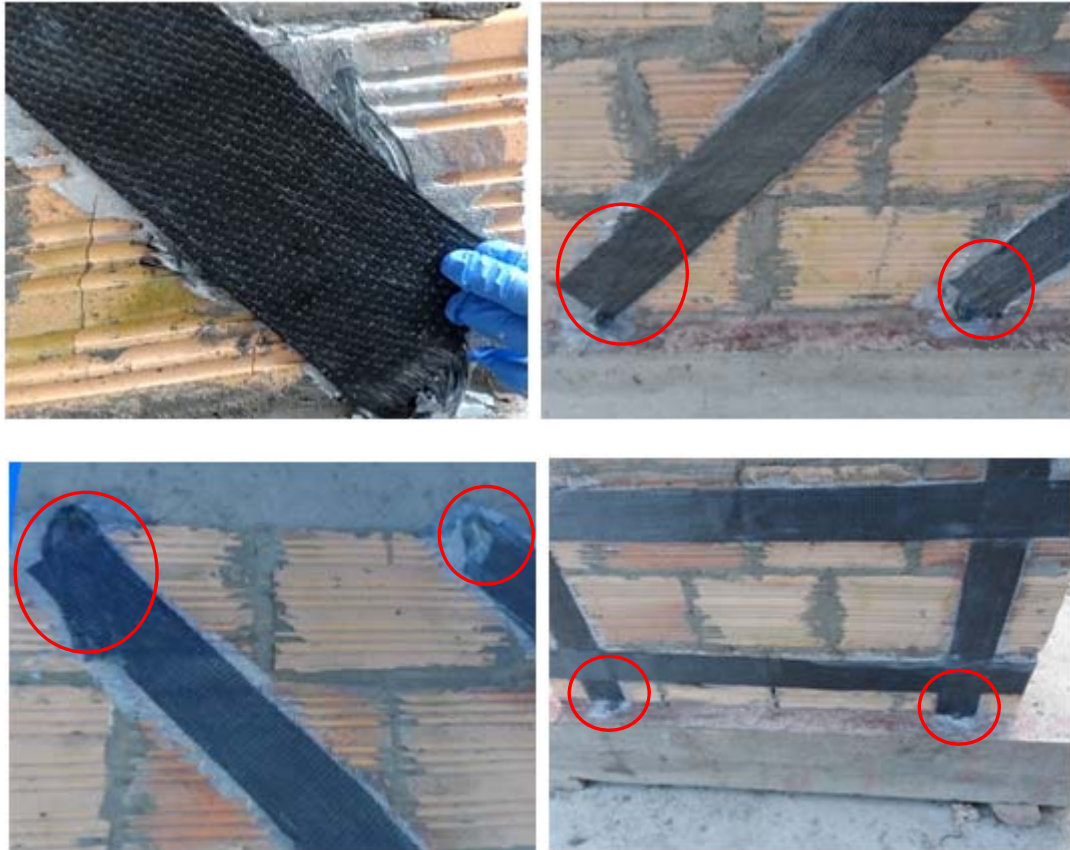
6) Quitar los hilos de la costura y deshilar completamente la fibra que quedó por fuera.



Estado de los corbatines después de anclados



7) Pegar la fibra deshilachada sobre el muro de mampostería en la dirección en que irá la tira de refuerzo. Tratar de que los hilos queden lo mejor distribuidos y no unos sobre otros.



8) Pegar la tira de refuerzo sobre el corbatín deshilachado, previamente adherido al muro, y continuar con el reforzamiento (paso 12 Figura 4-14).

Figura 4-17 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.1.
Fuente: El autor.

El sistema de anclaje No. 1 era con el que se pensaba vincular todos los muros de ensayo, pero al observar que su comportamiento no era el esperado surgieron nuevas posibilidades de anclaje hasta encontrar el que se consideró óptimo.

- *Sistema de anclaje No. 2: Extensión del FRP hasta la cimentación*

El sistema de anclaje No.2 consistió en extender las tiras de FRP hasta la viga de cimentación. Para esto fue necesario construir unos chaflanes sobre la viga que permitieran que la fibra pasara de manera más suave del muro a la viga y no quedara con quiebres que pudieran cortarla o rasgarla durante su funcionamiento. La secuencia del proceso constructivo de este sistema de anclaje se presenta en la Figura 4-18.



1) Picar la superficie de la viga donde se construiría el chaflán para mejorar la adherencia entre el chaflán y la viga.

2) Aplicar un producto que sirva de puente de adherencia entre el chaflán y la viga y mejore esa propiedad.



3) Construir los chaflanes con una mezcla de mortero generando una superficie que produzca un cambio suave y moderado de la fibra del muro hacia la cimentación.



4) Si la tira se va colocar completa, se continúa con el paso 10 de la Figura 4-14; si se va a realizar un traslape de las fibras se debe lijar la superficie de la fibra por donde se realizará el traslape hasta eliminar el aspecto cristalino (brillante) de la misma. Luego se aplica un poco de diluyente (thinner) que mejore la adherencia entre las dos fibras. Finalmente, se pega la fibra como se indica en el paso 12 de la Figura 4-14 hasta la distancia considerada en la viga de cimentación.



Estado final del muro con el sistema de anclaje No. 2.

Figura 4-18 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.2.
Fuente: El autor.

- *Sistema de anclaje No. 3: Macizos de concreto y extensión del FRP hasta el macizo.*

En el tercer sistema de anclaje se eliminaron los dos ladrillos de las esquinas de los muros y se fundieron, en su reemplazo, unos macizos de concreto anclados a la cimentación con 3 barras #3 a una profundidad de 15 cm. Una vez fraguados los macizos se traslaparon las fibras y se extendieron hasta estos elementos, garantizando así la vinculación del muro con la cimentación. La secuencia del proceso constructivo de este sistema de anclaje se presenta en la Figura 4-19.



1) Con la ayuda de una sierra o cortadora y herramienta menor, eliminar los dos ladrillos de las esquinas inferiores del muro.



2) Realizar las perforaciones para anclar las barras de refuerzo



3) Realizar los pasos 2 y 4 de la Figura 4-17 e introducir la barra lentamente.



4) Colocar unas barras horizontales, de diámetro menor a las del anclaje, que mejoren el confinamiento del macizo de concreto. Realizar pasos 1 y 2 de la Figura 4-18.



5) Colocar formaleta de madera dejando un espacio en la parte extrema del muro que permita el vaciado del concreto.



Estado del muro al retirar las formaletas de los macizos



6) Realizar el paso 4 de la Figura 4-18 extendiendo la fibra hasta el macizo de concreto.



Estado final del muro con el sistema de anclaje No. 3. La imagen muestra que dos tiras se extienden hasta la viga de cimentación, lo cual no es representativo en el sistema de anclaje en estudio.

Figura 4-19 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.3.

Fuente: El autor.

- *Sistema de anclaje No. 4: Macizos de concreto con el FRP pasando a través del macizo.*

El cuarto sistema de anclaje fue una mejora del sistema anclaje No.3. En este caso, se eliminaron los dos ladrillos de las esquinas de los muros (como el sistema de anclaje No. 3) pero sólo para los muros cortos; para los largos se eliminaron más unidades de mampostería de tal manera que se produjera un trabe entre el macizo de concreto y el muro de mampostería. Se fundieron, nuevamente, los macizos de concreto anclados a la cimentación, esta vez con 2 barras #4 una profundidad de 15 cm. La razón de las dos barras (y no las tres del sistema No. 3) con el motivo de dejar

un espacio para que pudiera pasarse el FRP a través del macizo en medio de las dos barras, el cual se fundió en dos etapas; en la primera, se fundió la parte superior colocando una sección de poliestireno en la parte baja de la formaleta de aproximadamente 8 cm de espesor. Una vez fraguada esta primera etapa, se eliminó el poliestireno y se colocó la fibra pasándola por la parte baja del macizo ya fundido y seguido a eso se realizó la segunda fundida de concreto completando el macizo y dejando la fibra en medio del mismo.

La razón por la cual en los muros pequeños sólo se eliminaron dos unidades (una en cada esquina) y no cinco (dos y media en cada esquina) como en los muros grandes se debía a que se esperaban menores solicitaciones; por consiguiente, se consideró que sólo con la extracción de dos unidades para el anclaje sería suficiente. Por otro lado, al eliminar cinco (5) unidades de mampostería en los muros cortos la estabilidad de estos elementos se vería comprometida así como la seguridad de los trabajadores que realizaban las labores de construcción.

La secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No. 4 se presenta en la Figura 4-20.



1) Con la ayuda de una sierra o cortadora y herramienta menor, eliminar las unidades requeridas de las esquinas inferiores del muro.



2) Realizar los pasos 2 a 4 de la Figura 4-19



3) Colocar los elementos de poliestireno en la parte baja del macizo para la segunda etapa de



4) Colocar las formaletas de madera para el vaciado del concreto de la primera etapa



5) Fundir el concreto de la primera etapa



Estado del muro al quitar las formaletas del concreto de la primera etapa



6) Eliminar el poliestireno de la parte inferior de los macizos y limpiar la superficie de cualquier residuo de poliestireno que pueda afectar la adherencia con la segunda etapa de concreto.



7) Colocar la fibra de carbono, pasándola por el espacio dejado por el poliestireno siguiendo los pasos 10 a 14 de la Figura 4-14 y el paso 4 de la Figura 4-18; si es necesario realizar pasos 1 y 2 de la Figura 4-18.



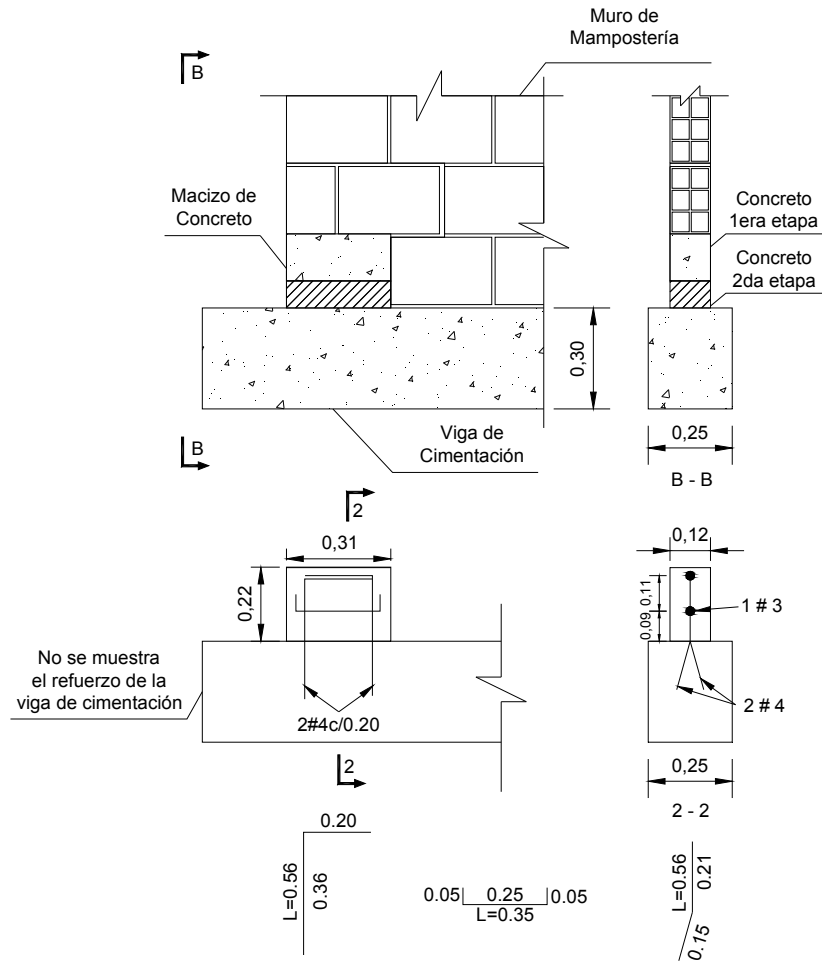
8) Colocar las formaletas de madera para el vaciado del concreto de la segunda etapa

Para ver el estado final de los muros con el sistema de anclaje No. 4 véase la Figura 4-16

Figura 4-20 Secuencia del proceso constructivo del sistema de anclaje No.4.

Fuente: El autor.

La Figura 4-21 presenta las dimensiones y el refuerzo de los macizos de concreto utilizados en el sistema de anclaje No. 4.



a)

4.5 Ensayos en muros a escala real

4.5.1 Descripción de los muros

En el programa experimental fueron construidos 14 muros de mampostería de arcilla, utilizando el bloque de perforación horizontal, conocido tradicionalmente como bloque No. 5; seis (6) de ellos tenían dimensiones de 1,23 m de largo por 1,90 m de alto, para una relación altura/largo (h/L) mayor que 1 (Ver Figura 4-22), y los ocho (8) restantes de 2,47 m de largo por 1,90 m de alto, para una relación altura/largo menor que 1 (Ver Figura 4-24).

La altura de los dos tipos de muros requirió de nueve (9) hiladas de bloque. Los especímenes fueron colocados sobre una viga de cimentación de 0.25x0.30 m de sección transversal y 1,73 m de longitud para los muros cortos y 2.97 m para los muros largos. En la parte superior de los muros se construyó una viga de borde de 0.15x0.15m de sección transversal cuya longitud estaba determinada por el largo del muro. Los espesores del mortero de pega variaron entre 7 y 13 mm para un promedio aproximado de 10 mm (1 cm). Las Figuras 4-23 y 4-25 presentan un modelado 3D del muro corto y el muro largo, respectivamente.

En la parte respectiva al reforzamiento, se siguieron los lineamientos establecidos en el Documento **ACI 440.7R-10**; en este caso unos muros se diseñaron para que la falla por corte antecediera la falla por flexión y otros el caso contrario. Para lograr esto, fue necesario que tuvieran un refuerzo con tejidos de fibra de carbono que contrarrestara los esfuerzos de flexión producidos por las cargas. En las configuraciones de reforzamiento (ver numeral 4.5.2 de este documento) se explica con mayor detalle la ubicación del material de refuerzo en el muro para lograr este objetivo.

De los catorce (14) muros construidos, ocho (8) fueron ensayados con carga estática (ensayos monotónicos) y seis (6) con carga dinámica (ensayos dinámicos). De los ocho (8) ensayados bajo carga estática, dos (2) estaban sin refuerzo y los seis (6) restantes estaban reforzados; mientras que de los seis (6) ensayados bajo carga dinámica todos estaban reforzados. En la Tabla 4-1 se describen los ensayos descritos anteriormente así como las dimensiones y cantidades de los especímenes de prueba.

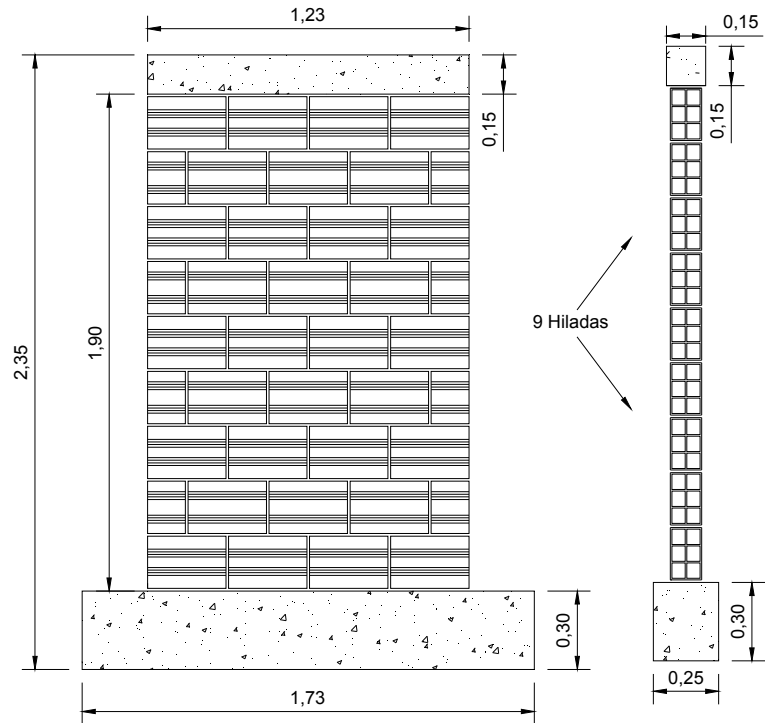


Figura 4-22 Dimensiones y esquema del muro corto $h/L > 1$, $1.90/1.23 = 1.54$. Unidades en metros. Fuente: El autor

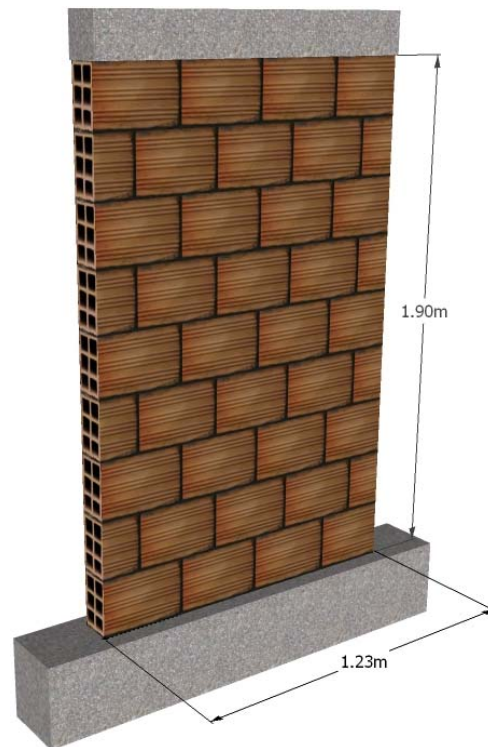


Figura 4-23 Modelado 3D del muro corto sin reforzamiento. Fuente: El autor

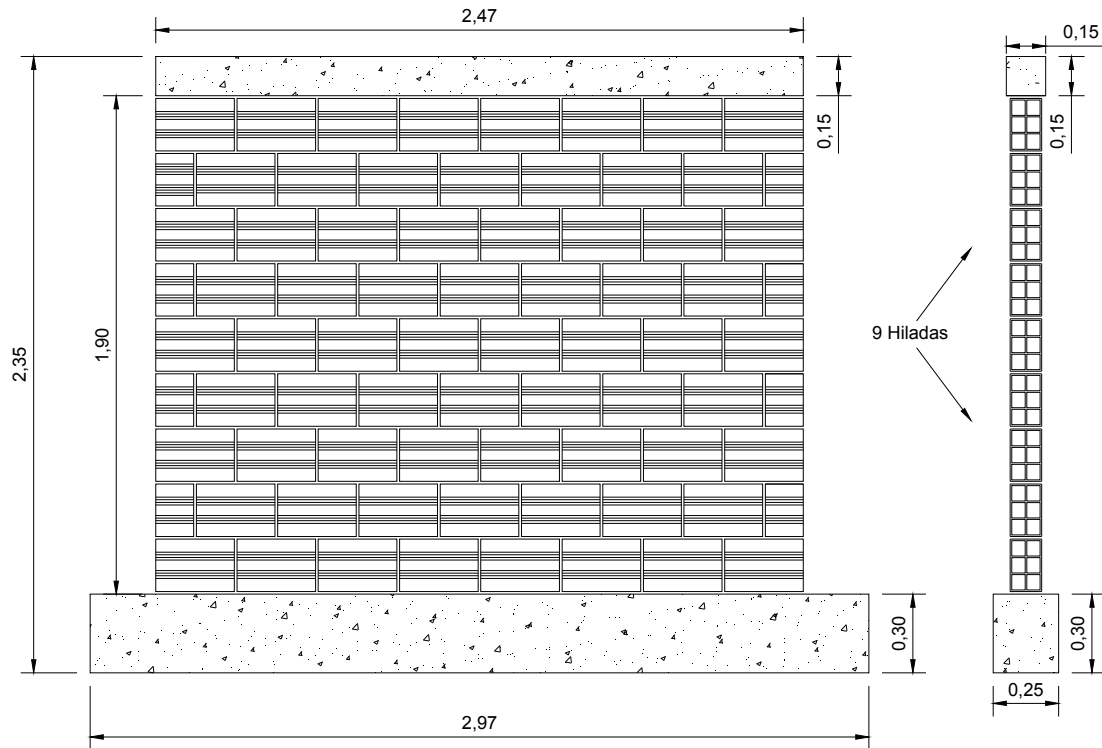


Figura 4-24 Dimensiones y esquema del muro largo.
 $h/L < 1$, $1.90/2.47 = 0.77$. Unidades en metros. Fuente: El autor

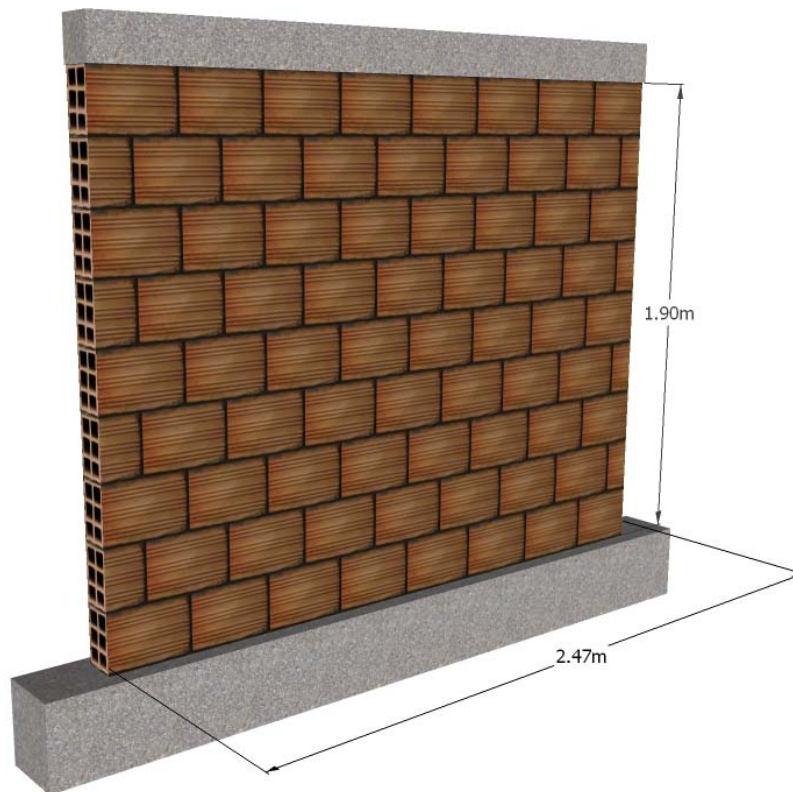


Figura 4-25 Modelado 3D del muro largo sin reforzamiento.
 Fuente: El autor

4.5.2 Configuraciones de reforzamiento

El material de refuerzo consistió en tejidos de fibra de carbono adherido a la superficie externa de los muros de mampostería, mediante un adhesivo epóxico, por una sola cara (ver numeral 2.2.5 de este documento).

La orientación que tengan los tejidos en la superficie del muro depende de la propiedad que se quiera mejorar en el elemento. Por ejemplo, si se desea mejorar la capacidad por corte se recomienda usar una orientación horizontal; por el contrario, si lo que se desea mejorar es la capacidad a flexión la orientación vertical será la mejor opción; finalmente, si se desean mejorar ambas propiedades se recomienda combinar ambas orientaciones, o utilizar orientaciones en diagonal.

Para la presente investigación se utilizaron dos (2) configuraciones de reforzamiento; una en grilla y otra en diagonal. A continuación se hace una descripción de cada una de ellas.

- *Configuración en grilla*

La configuración en grilla estaba conformada por bandas de tejido de fibra de carbono colocadas horizontal y verticalmente. Con esta orientación, se buscó que las bandas horizontales asumieran los esfuerzos por corte y las verticales los esfuerzos producidos por los efectos de flexión. Tanto para los muros cortos ($\text{altura/longitud} > 1$) como para los largos ($\text{altura/longitud} < 1$) se utilizaron 5 bandas horizontales de 100 mm de ancho colocadas cada 40 cm entre centro y centro de cada tejido. Verticalmente, se utilizaron dos bandas ubicadas cerca a los extremos de los muros. En los muros largos tenían 150 mm de ancho y en los cortos, 100 mm de ancho. En la Figura 4-26 se presentan los esquemas de reforzamiento en grilla y en la Figura 4-27 un modelado en 3D del mismo reforzamiento.

- *Configuración en diagonal*

La configuración en diagonal estaba conformada por bandas de tejido de fibra de carbono colocadas formando un ángulo aproximado de 45° con la horizontal. Con esta orientación, se buscó que una parte de las bandas asumieran los esfuerzos por corte y otra parte los esfuerzos producidos por los efectos de flexión. Tanto para los muros cortos ($\text{altura/longitud} > 1$) como para los largos ($\text{altura/longitud} < 1$) se utilizaron 4 bandas de 100 mm de ancho ubicadas en ambos sentidos. En la Figura 4-28 se presentan los esquemas

de reforzamiento en diagonal y en la Figura 4-29 un modelado en 3D del mismo reforzamiento.

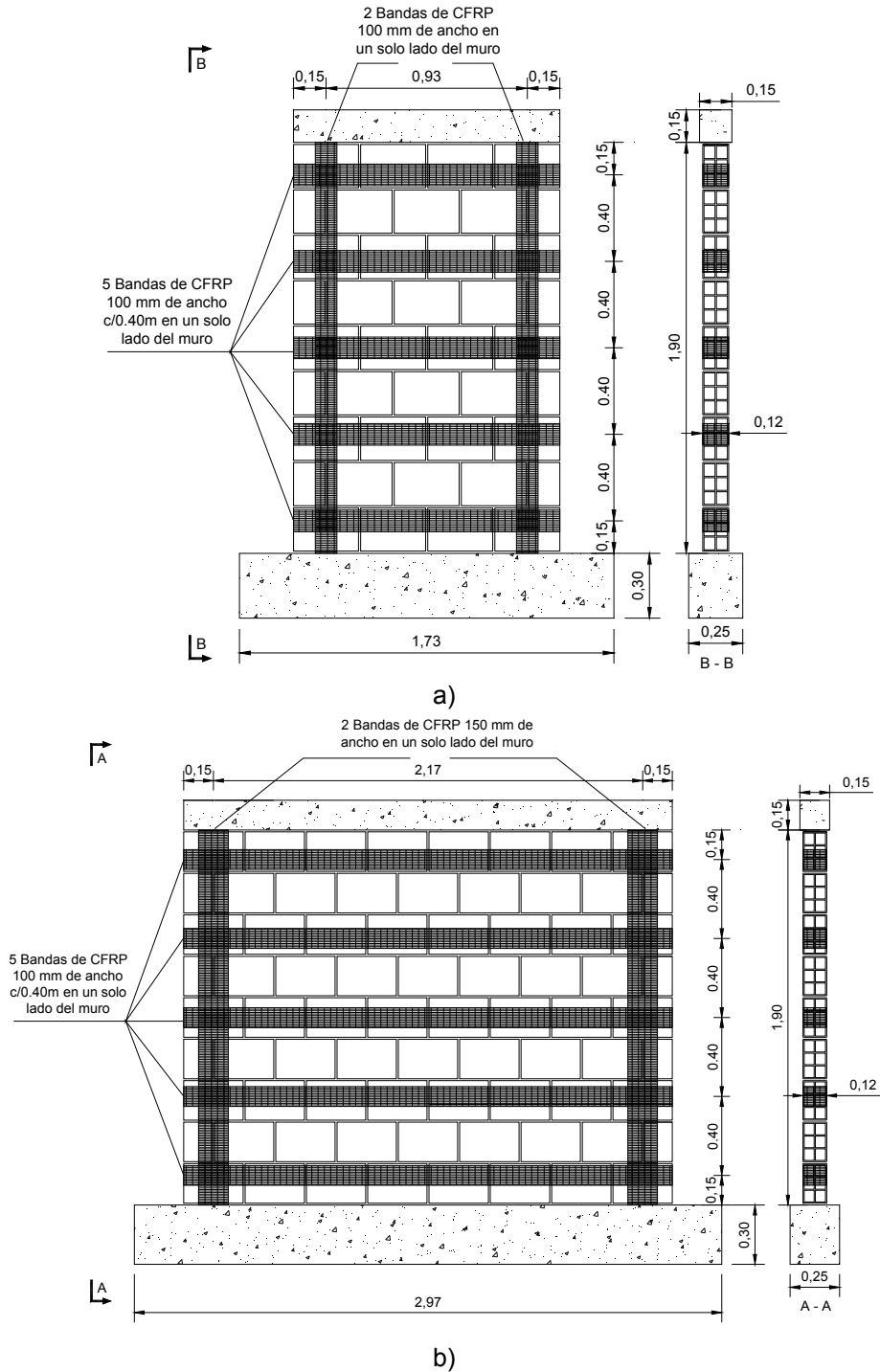


Figura 4-26 Esquemas de reforzamiento en grilla
a) Muro corto; b) Muro largo. Unidades en metros. No se presenta el sistema de anclaje.
Fuente: El autor

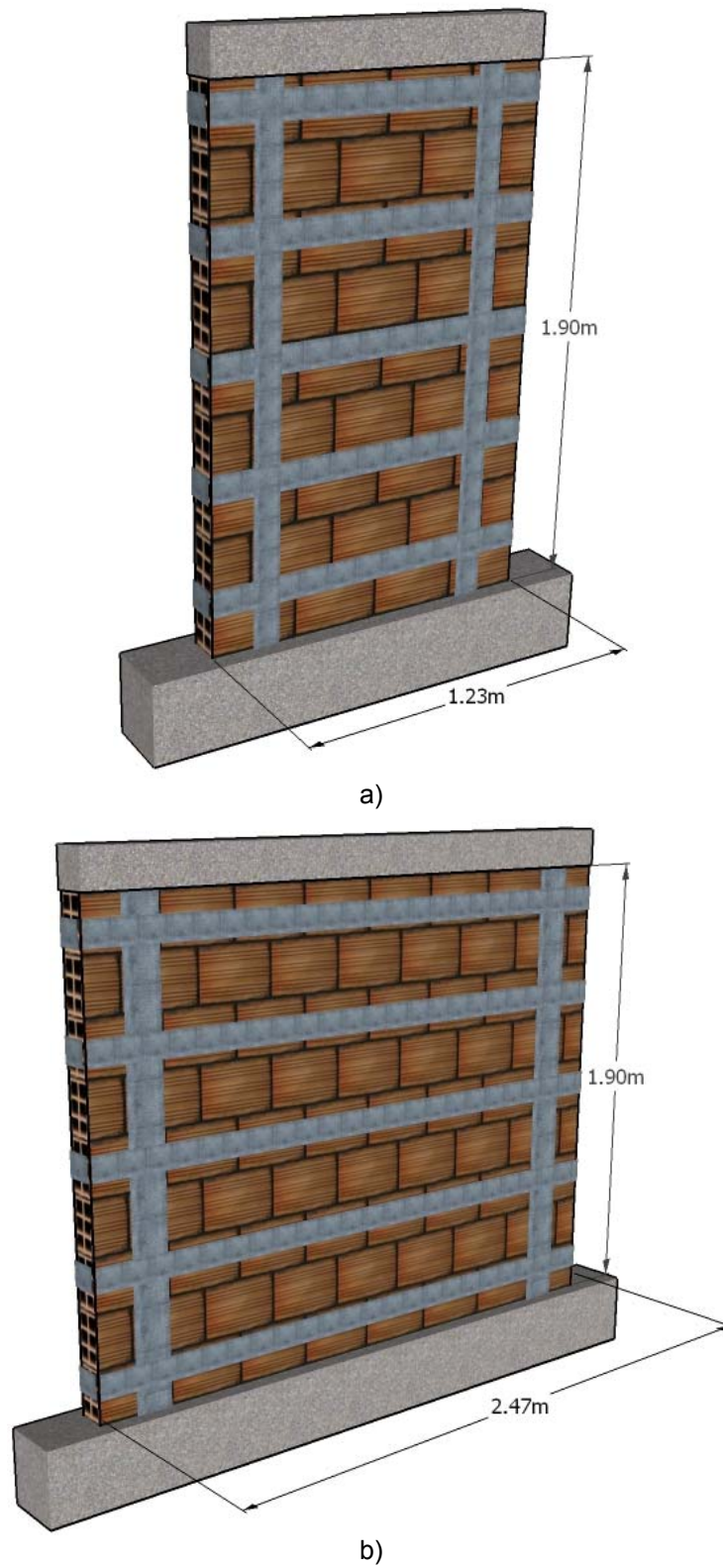


Figura 4-27 Modelado 3D del reforzamiento en grilla
a) Muro corto; b) Muro largo. No se presenta el sistema de anclaje.
Fuente: El autor

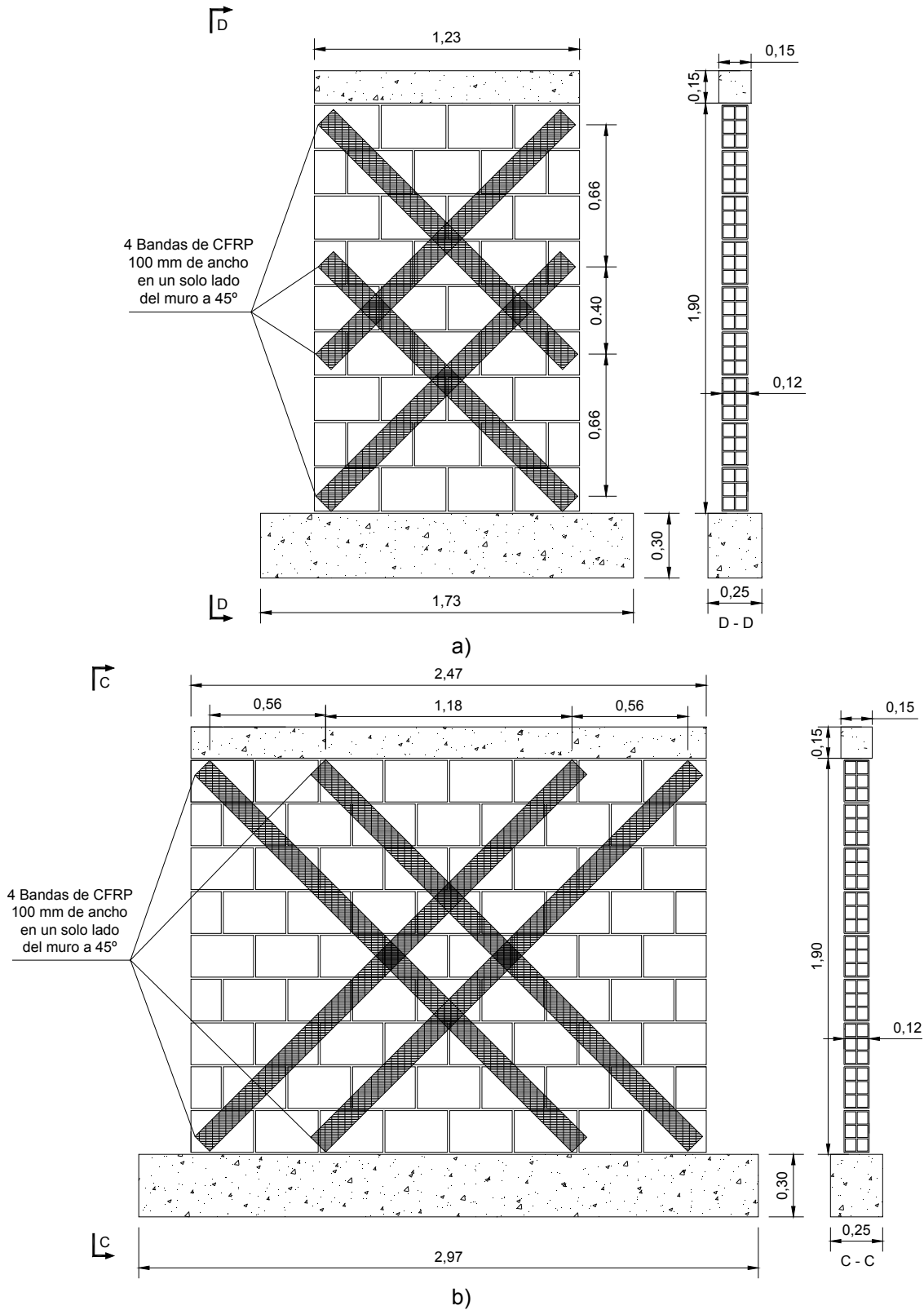


Figura 4-28 Esquemas de reforzamiento en diagonal
a) Muro corto; b) Muro largo. Unidades en metros. No se presenta el sistema de anclaje.
Fuente: El autor

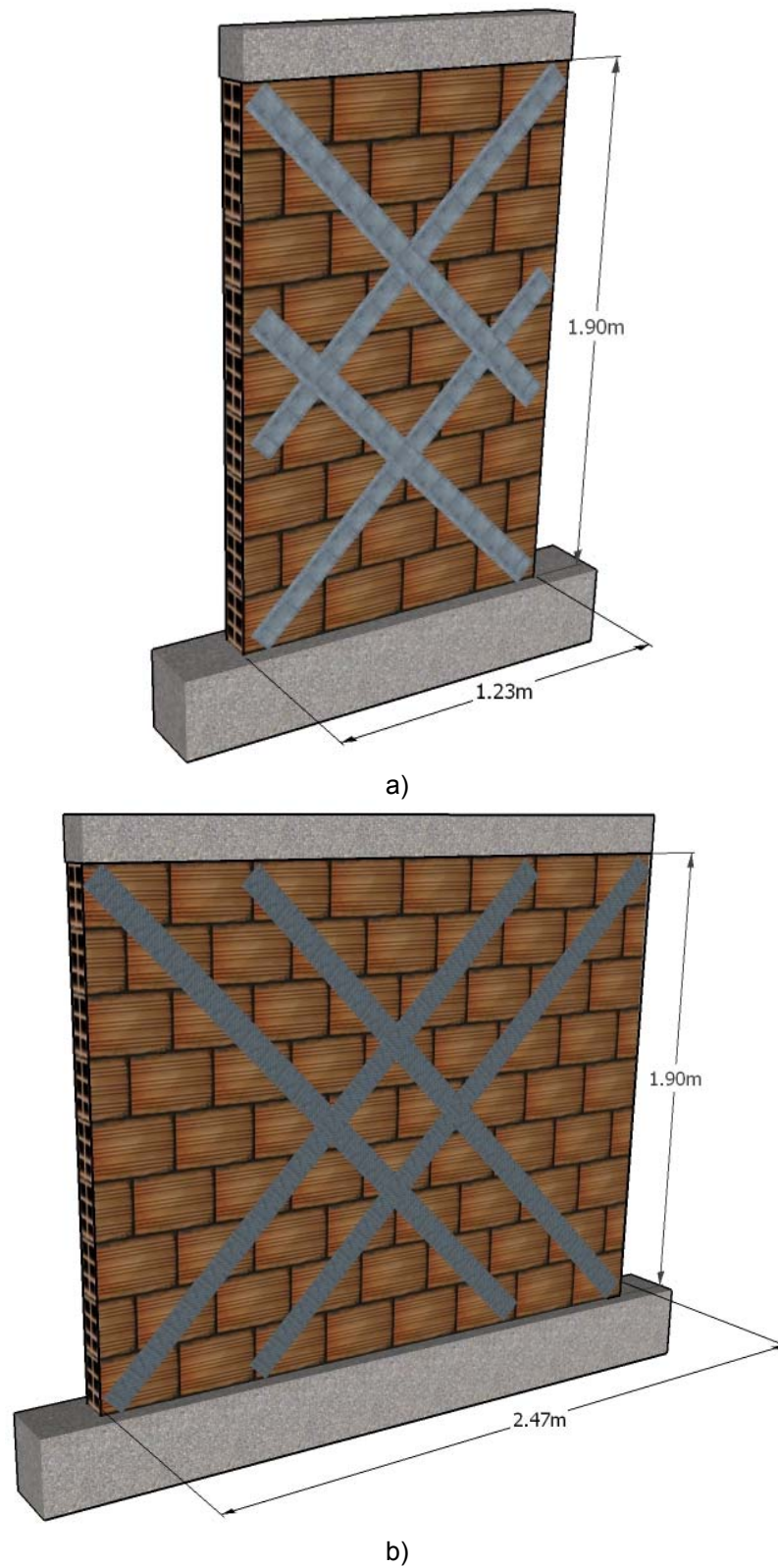


Figura 4-29 Modelado 3D del reforzamiento en diagonal
 a) Muro corto; b) Muro largo. No se presenta el sistema de anclaje.
 Fuente: El autor.

4.5.3 Normas y documentos de referencia

Para llevar a buen término el desarrollo de esta investigación, fue necesario tener en cuenta normas y documentos que sirvieran de referencia a la hora de diseñar y construir los especímenes de prueba así como la realización de los respectivos ensayos a los que fueron sometidos. A continuación en la Tabla 4-3 se presenta un listado con el documento o norma utilizada con una descripción del procedimiento realizado.

Tabla 4-3 Normas y documentos de referencia

Norma /Documento	Descripción	Procedimiento realizado
ACI 440.7R-10	Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Systems for Strengthening Unreinforced Masonry Structures	Diseño de los reforzamientos con FRP de los especímenes de prueba construidos y cálculo de las resistencias teóricas.
ASCE 41-06	Seismic Rehabilitation of Existing Buildings	Cálculo de las resistencia teóricas de los muros sin refuerzo.
Manual AIS	Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismo resistente de viviendas de mampostería	Proceso constructivo de los muros de mampostería.
NSR - 10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente	Cálculo de propiedades mecánicas de los materiales.
NTC 111 / 220 / 3495 / 3546 / 4017 / 4205 / 673	Normas Técnicas Colombianas	Realización de los ensayos sobre los materiales individuales.
FEMA 461	Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components	Establecimiento del protocolo de carga de los ensayos dinámicos.

4.5.4 Cálculo de la resistencia teórica de los muros de prueba

Como ya se mencionó en la Tabla 4-3, el diseño de los reforzamientos con FRP de los especímenes de prueba así como el respectivo cálculo de la resistencia teórica de los mismos se basó siguiendo los planteamientos establecidos en el documento **ACI 440. 7R-10**. A continuación se realiza una breve descripción de las consideraciones generales de la guía.

- *Filosofía de diseño*

La filosofía de diseño en que están basados los procedimientos establecidos en la guía ACI 440.7R-10 es la de los Estados Límites.

- *Propiedades de los materiales*

El comportamiento de los materiales compuestos (FRP) es totalmente elástico hasta la falla; de esta manera sus relaciones esfuerzo – deformación cumplen la ley de Hooke. Para fines de diseño, los valores de esfuerzo y deformación reportados por los fabricantes deben ser afectados por unos coeficientes de reducción de exposición ambiental así como otros que han resultado de investigaciones anteriores.

- *Resistencia nominal a corte*

Se debe buscar que la capacidad nominal a corte del elemento sea mayor que la capacidad demandada en el mismo ($\phi V_n \geq V_u$). Esa capacidad nominal será igual al aporte que haga tanto el elemento sin refuerzo como el realizado por el material de refuerzo.

$$V_{n,s} = V_n^{URM} + V_f$$

Ecuación 4-1

$V_{n,s}$ = Resistencia nominal a corte del muro

V_n^{URM} = Resistencia al corte del muro sin refuerzo

V_f = Resistencia al corte proporcionada por el material de refuerzo

- *Resistencia nominal a flexión*

Se debe buscar que la capacidad nominal a flexión del elemento sea mayor que la capacidad demandada en el mismo ($\phi M_n \geq M_u$). En este caso esa capacidad nominal será igual a la sumatoria de momentos de las fuerzas producidas en cada zona de reforzamiento por la distancia de dicha zonal al eje neutro de la sección estudiada.

Las memorias de cálculo del reforzamiento de los muros se presentan en el Anexo H del presente documento; para cualquier inquietud sobre los procedimientos seguidos el lector puede remitirse al documento ya referenciado.

4.5.5 Códigos de identificación de especímenes de prueba

Debido al número de especímenes que se ensayaron y las diferentes variables estudiadas, fue necesario establecer un código alfanumérico que permitiera la identificación de cada muro de ensayo. En el código, ya mencionado, el primer término indicaba si el espécimen estaba reforzado, R o no SR; el segundo, la configuración de reforzamiento, G si era en grilla o D si era en diagonal; el tercer término indicaba el tamaño del muro, C si era el muro corto ($h/L > 1$) o L si era el muro largo ($h/L < 1$). El dígito siguiente indicaba el consecutivo de cada espécimen y finalmente, el último término indicaba si el ensayo era estático, ES o dinámico, DI. Para los muros sin refuerzo, el segundo término se omitió. La Tabla 4-4 presenta los códigos de identificación descritos anteriormente, para cada uno de los especímenes de prueba.

Tabla 4-4 Códigos de identificación para los especímenes de prueba

ESPÉCIMEN N°	ESPÉCIMEN REFORZADO	CONFIGURACIÓN REFORZAMIENTO	TAMAÑO ESPÉCIMEN	CONSECUTIVO ESPÉCIMEN	TIPO DE ENSAYO	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN
1	No	-	Corto	1	Estático	SR-C-1-ES
2	No	-	Largo	1	Estático	SR-L-1-ES
3	Si	Grilla	Corto	1	Estático	R-G-C-1-ES
4	Si	Grilla	Corto	2	Estático	R-G-C-2-ES
5	Si	Diagonal	Largo	1	Estático	R-D-L-1-ES
6	Si	Diagonal	Largo	2	Estático	R-D-L-2-ES
7	Si	Diagonal	Largo	3	Estático	R-D-L-3-ES
8	Si	Diagonal	Largo	4	Estático	R-D-L-4-ES
9	Si	Diagonal	Largo	1	Dinámico	R-D-L-1-DI
10	Si	Diagonal	Largo	2	Dinámico	R-D-L-2-DI
11	Si	Grilla	Largo	1	Dinámico	R-G-L-1-DI
12	Si	Diagonal	Corto	1	Dinámico	R-D-C-1-DI
13	Si	Diagonal	Corto	2	Dinámico	R-D-C-2-DI
14	Si	Grilla	Corto	1	Dinámico	R-G-C-1-DI

4.5.6 Ensayos monotónicos (Estáticos)

Se colocó cada espécimen de prueba en el marco de carga del laboratorio de estructuras y materiales; se instrumentó por medio de deformímetros mecánicos de sensibilidad 10^{-2} milímetros, estos se ubicaron en la cara opuesta a la aplicación de carga (uno superior, δ_1 y otro inferior δ_2 , para medir el desplazamiento lateral), Adicionalmente se colocó un cinta métrica en la parte extrema superior del muro para verificar los desplazamientos

registrados. Se aplicó fuerza lateral por medio de un gato hidráulico de 250 kN de capacidad, la carga fue medida por medio de una celda de carga de 50 kN de capacidad y sensibilidad de 10 N; el proceso de carga fue suspendido al obtenerse la falla del muro, la cual superaba las condiciones de servicio. En la Figura 4-30 se presenta el montaje del ensayo monotónico, de uno de los muros de prueba, descrito anteriormente.



Figura 4-30 Montaje del ensayo monotónico.
Fuente: El autor.

4.5.7 Protocolo de carga

El protocolo de carga utilizado para la realización de los ensayos dinámicos fue el Protocolo I (FEMA 461) denominado Prueba cíclica cuasi – estática, el cual se explica a continuación.

Protocolo I: Prueba cíclica cuasi – estática.

El protocolo I, Prueba cíclica cuasi – estática, es utilizado para determinar el comportamiento y rendimiento de elementos que son sometidos principalmente a la aplicación de fuerzas sísmicas o desplazamientos inducidos por sismos. En este protocolo, los efectos sísmicos se replican por aplicación cíclica lenta de cargas (o deformaciones) cuya historia (en términos de la carga aplicada o en términos de la deformación causada por una carga aplicada) sigue un patrón predeterminado. Este protocolo se puede utilizar para determinar los datos de fragilidad de muchos elementos estructurales y no

estructurales y, además, puede ser usado para estudiar propiedades de fuerza – deformación así como obtener datos de histéresis en elementos estructurales necesarios para el análisis estructural. Entre los elementos estructurales que pueden ser probados de acuerdo con este protocolo se incluyen los muros de corte (que es el objeto del proyecto en estudio), uniones viga-columna y nudos de pórticos. Entre los elementos no estructurales para los que este protocolo es adecuado, se incluyen paneles de revestimiento, paneles de cristal y muros divisorios de drywall.

Historial de carga del protocolo I

En la Figura 4-31 se presenta un diagrama conceptual del historial de carga recomendado en el protocolo I. Este historial de carga consiste en repetir ciclos de pasos incrementando las amplitudes de deformación. Por cada amplitud se deben completar dos (2) ciclos, es decir que cada paso tiene un total de dos (2) ciclos.

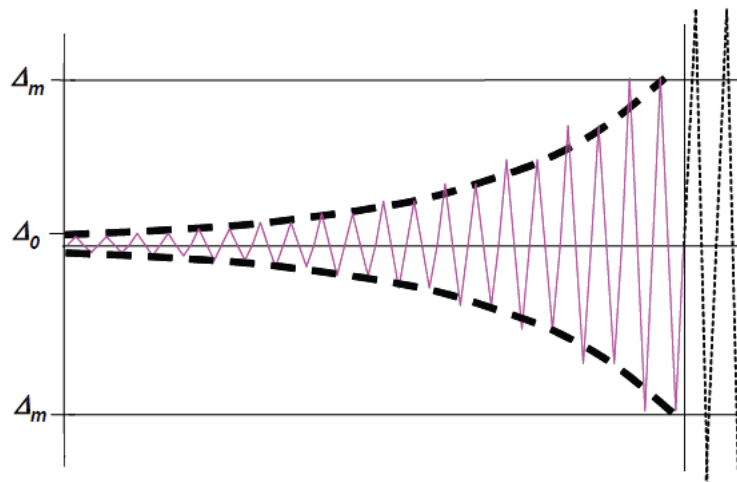


Figura 4-31 Historial de carga controlado por la deformación.

Fuente: Tomado de FEMA 461. p. 22.

Δ_0 = Corresponde a la amplitud de deformación más pequeña. Debe ser menor que la amplitud a la que se observó por primera vez el estado de daño más bajo. Antes de alcanzar el estado de daño más bajo deben haber sido ejecutados al menos seis ciclos. Si no se tienen datos de deformación de inicio de daño se puede asumir el valor de Δ_0 como una deriva de piso del 0.15%.

Δ_m = Corresponde a la amplitud de deformación máxima del historial de carga. Es un valor de deformación en el que se espesa se inicie el estado de daño más severo. Si el estado de daño más grave aún no se ha producido en el valor objetivo, la historia de carga se puede continuar aumentando con incrementos de amplitud de $0.3\Delta_m$. Si no se tienen datos de deformación de inicio del daño más severo se puede asumir el valor de Δ_m como una deriva de piso del 3.0%.

Ambos valores (Δ_0 y Δ_m) fueron determinados a partir de los ensayos monotónicos realizados sobre dos (2) especímenes reforzados, como se describió en el numeral 4.5.4 de este documento, y dieron como resultado los siguientes valores: $\Delta_0 = 2.85$ mm $\Delta_m = 50$ mm; correspondientes a una deriva de piso de 0.15% y 2.63% respectivamente.

La amplitud, a_i , de los ciclos, partiendo desde seis ciclos antes de Δ_0 se debe ir aumentando un 40% con respecto a la amplitud inmediatamente anterior ($a_{i+1} = 1.4a_i$) hasta alcanzarla amplitud máxima a_n (Δ_m).

El número de pasos que debe tener el historial de carga es de mínimo 10. Para el caso en estudio se realizaron 13 pasos.

En la Tabla 4-5 se presenta los valores que conforman el protocolo de carga utilizado en los ensayos dinámicos. En la Figura 4-32 se muestra la representación gráfica del protocolo de carga en términos de desplazamiento y de deriva de piso (% h_p). La Figura 4-33 muestra la relación de amplitudes a medida que avanzan los pasos del historial de carga.

Tabla 4-5 Valores del protocolo de carga

PASO	CICLO	TIEMPO (s)	DESPLAZAMIENTO (mm)	a_i/a_n	DERIVA (% h_p)
0	0	0.0	0.00	0.00	0
1	1	3.3	0.95	0.02	0.05
		6.7	-0.95		-0.05
	2	10.0	0.95		0.05
		13.3	-0.95		-0.05
2	3	16.7	1.33	0.03	0.07
		20.0	-1.33		-0.07
	4	23.3	1.33		0.07
		26.7	-1.33		-0.07

PASO	CICLO	TIEMPO (s)	DESPLAZAMIENTO (mm)	a_i/a_n	DERIVA (%hp)
3	5	30.0	1.86	0.04	0.10
		33.3	-1.86		-0.10
	6	36.7	1.86		0.10
		40.0	-1.86		-0.10
4	7	43.3	2.61	0.05	0.14
		46.7	-2.61		-0.14
	8	50.0	2.61		0.14
		53.3	-2.61		-0.14
5	9	56.7	3.65	0.07	0.19
		60.0	-3.65		-0.19
	10	63.3	3.65		0.19
		66.7	-3.65		-0.19
6	11	70.0	5.11	0.10	0.27
		73.3	-5.11		-0.27
	12	76.7	5.11		0.27
		80.0	-5.11		-0.27
7	13	83.3	7.15	0.14	0.38
		86.7	-7.15		-0.38
	14	90.0	7.15		0.38
		93.3	-7.15		-0.38
8	15	96.7	10.01	0.20	0.53
		100.0	-10.01		-0.53
	16	103.3	10.01		0.53
		106.7	-10.01		-0.53
9	17	110.0	14.02	0.28	0.74
		113.3	-14.02		-0.74
	18	116.7	14.02		0.74
		120.0	-14.02		-0.74
10	19	123.3	19.63	0.39	1.03
		126.7	-19.63		-1.03
	20	130.0	19.63		1.03
		133.3	-19.63		-1.03
11	21	136.7	27.48	0.55	1.45
		140.0	-27.48		-1.45
	22	143.3	27.48		1.45
		146.7	-27.48		-1.45
12	23	150.0	38.47	0.77	2.02
		153.3	-38.47		-2.02
	24	156.7	38.47		2.02
		160.0	-38.47		-2.02
13	25	163.3	50.01	1.00	2.63
		166.7	-50.01		-2.63
	26	170.0	50.01		2.63
		173.3	-50.01		-2.63

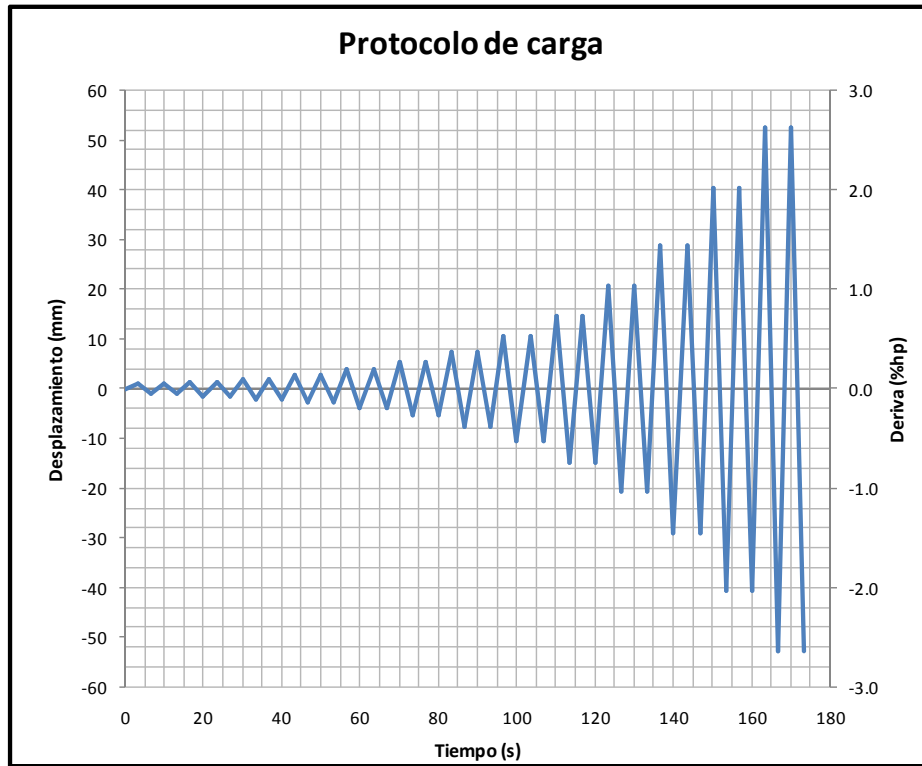


Figura 4-32 Protocolo de carga.
Fuente: El autor

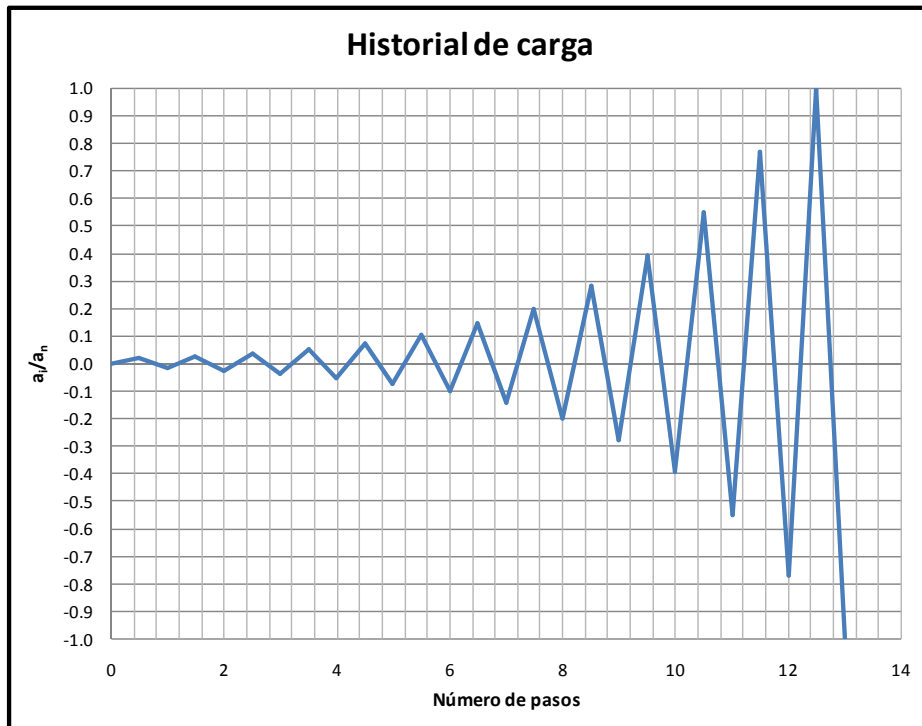


Figura 4-33 Relación de amplitudes en el historial de carga.
Fuente: El autor

4.5.8 Ensayos dinámicos¹ (Cíclicos)

Se colocó cada espécimen de prueba en el marco de carga del laboratorio de estructuras y materiales; la instrumentación se realizó por medio de transductores de desplazamiento lineal (LVDT's por sus siglas en inglés) en dirección horizontal; adicionalmente en algunos muros reforzados se emplearon galgas extensiométricas (strain gages) para medir deformaciones unitarias en la fibra de carbono; para la aplicación de la carga se empleó un actuador dinámico MTS de 250 kN de capacidad a tracción, 300 kN a compresión y 500 mm de recorrido siguiendo el protocolo de carga establecido en el numeral 4.5.7 de este documento. El proceso de carga fue suspendido al obtenerse la falla del muro, la cual superaba las condiciones de servicio. En la Figura 4-34 se presenta el montaje del ensayo dinámico de uno de los muros de prueba, descrito anteriormente y en la Figura 4-35 se presentan algunos detalles de dicho montaje.

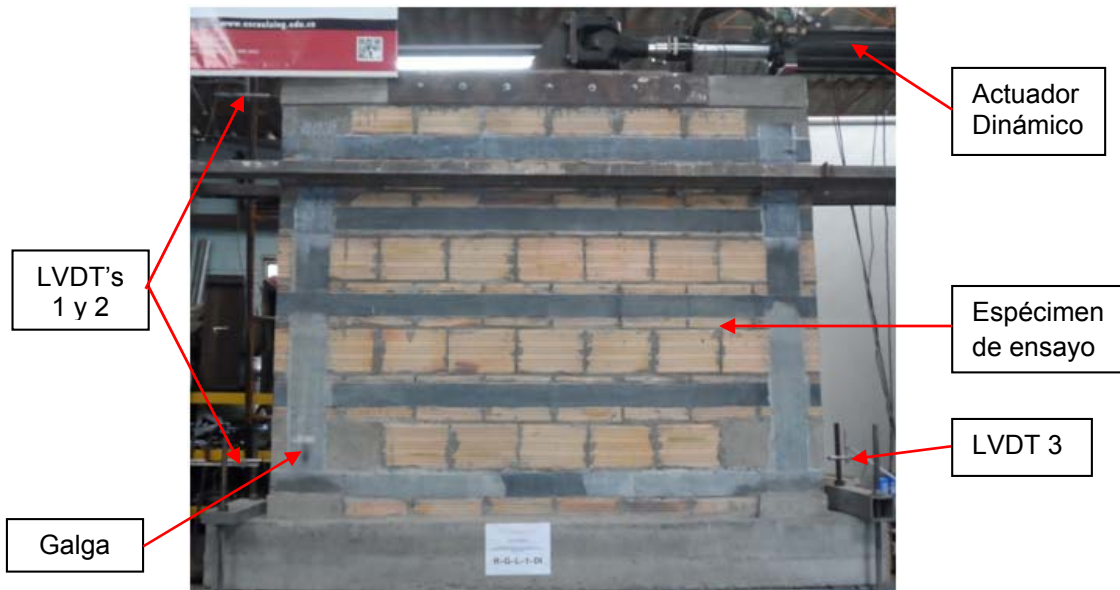


Figura 4-34 Montaje del ensayo Dinámico.
Fuente: El autor

¹ Es importante aclarar que las frecuencias de ensayo entre 0.1 y 0.2 Hz. usadas en esta investigación, no representan adecuadamente las producidas en un verdadero evento sísmico y por esta razón los ensayos realizados son pseudo – dinámicos. Sin embargo, a lo largo del documento se utiliza la palabra “dinámicos” para hacer referencia a los ensayos cíclicos en los especímenes de prueba.

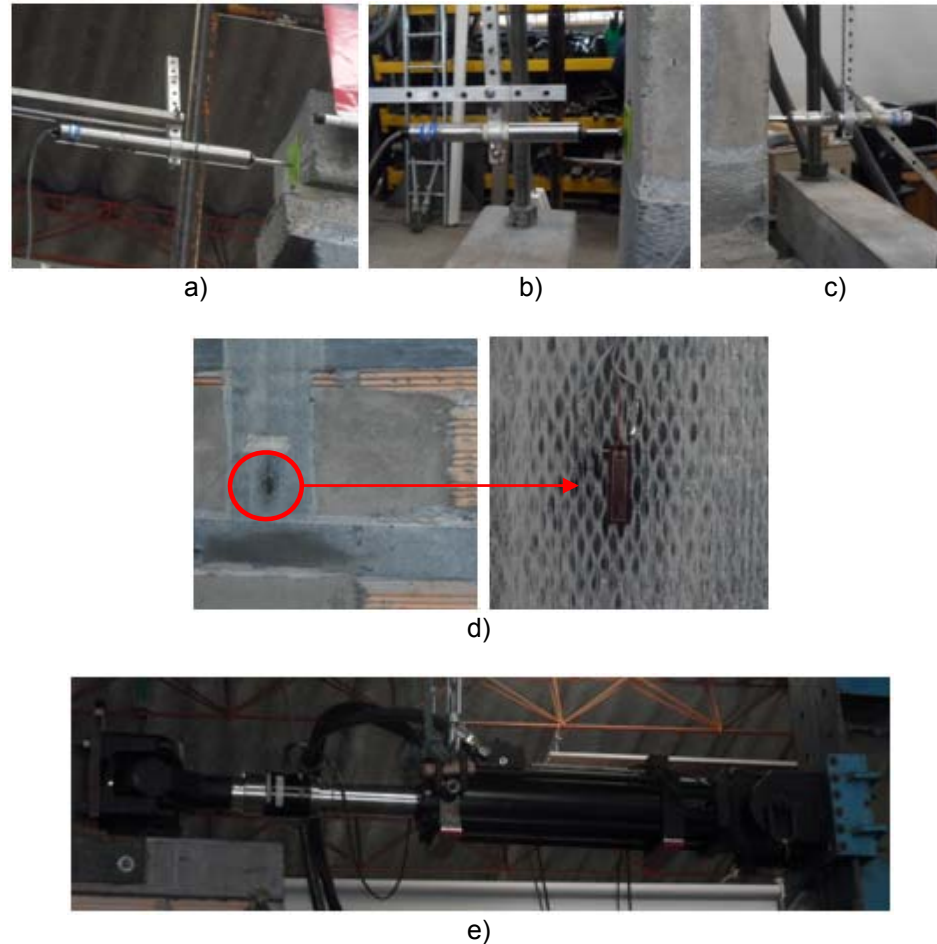


Figura 4-35 Detalles del montaje del ensayo Dinámico.

- a) Ubicación LVDT 1; b) Ubicación LVDT 2; c) Ubicación LVDT 3; d) Galga extensiométrica
 e) Actuador dinámico. Fuente: El autor

Para aplicar la carga con el actuador, fue necesario colocar un dispositivo de transferencia de carga al muro; este consistió en una ménsula metálica soldada a una platina inferior de $\frac{1}{2}$ " de espesor que a su vez estaba soldada a dos platinas laterales del mismo espesor que conformaban un cajón que encajaba dentro de la viga de borde superior; a través de unas perforaciones en las platinas laterales se anclaron a la viga siete pernos de varilla roscada de $\frac{1}{2}$ " de diámetro con un adhesivo epóxico para garantizar que el montaje quedara fijo en el muro. Finalmente, el actuador se conectó a la ménsula a través de 4 pernos de $\frac{7}{8}$ " de diámetro de acero de alta resistencia (ver Figura 4-36). Para los muros cortos se utilizó un montaje similar con la diferencia de que el dispositivo sólo tenía tres pernos anclados a la viga; esto se debió a que la sollicitación en estos elementos era mucho menor por lo tanto no se requerían de tantos pernos de anclaje (ver Figura 4-37).



a)



b)

Figura 4-36 Dispositivo de transferencia de carga del actuador a los muros largos.
a) Durante el montaje; b) Actuador conectado a la ménsula.
Fuente: El autor



a)



b)

Figura 4-37 Dispositivo de transferencia de carga del actuador a los muros cortos.
a) Durante el montaje; b) Actuador conectado a la ménsula.
Fuente: El autor

5. Resultados y análisis

En el capítulo 5 se presentan y analizan los resultados obtenidos del programa experimental; inicialmente se muestra el resultado de la caracterización de los materiales individuales, luego se presenta el resultado de los ensayos estáticos y dinámicos de cada uno de los especímenes de prueba junto con las curvas de histéresis (para ensayos dinámicos) a partir de los desplazamientos medidos en el plano y de las lecturas de carga reportadas por el actuador dinámico; con estas curvas se calculó el nivel de ductilidad alcanzado y los valores máximos de la capacidad resistente de los especímenes ante la sollicitación estudiada, se generaron gráficas de degradación de rigidez lateral para evaluar el comportamiento de los muros a medida que avanzan los ciclos de carga y se determinó el estado de esfuerzos en la falla al aplicar la carga lateral máxima; adicionalmente, se realizó una comparación entre los resultados de resistencia obtenidos en los especímenes de prueba y las cargas laterales a las que estarían sometidos los muros de una vivienda típica en un evento sísmico. Finalmente, el capítulo 5 muestra un análisis de costos de este sistema de reforzamiento externo y lo compara con el tradicional reconocido por el NSR – 10.

5.1 Resultados caracterización de materiales

A continuación se presentan los resultados de los ensayos individuales realizados a cada uno de los materiales utilizados en la investigación. Estos incluyen resistencia a la compresión y absorción en unidades de mampostería, resistencia a la compresión y fluidez en morteros, resistencia a la compresión en cilindros de mortero y concreto así como resistencia a la compresión en muretes.

5.1.1 Mampostería

Los resultados de los ensayos de compresión y absorción en las unidades de mampostería y del ensayo de compresión y módulo de elasticidad en muretes (prismas) se muestran a continuación:

- *Ensayo de compresión en unidades*

El ensayo de compresión en las unidades de mampostería dio como valor promedio 9.8 MPa. Los resultados detallados de este ensayo se presentan en el Anexo A de este documento. La Figura 5-1 muestra la falla de una de las unidades durante el ensayo en mención.

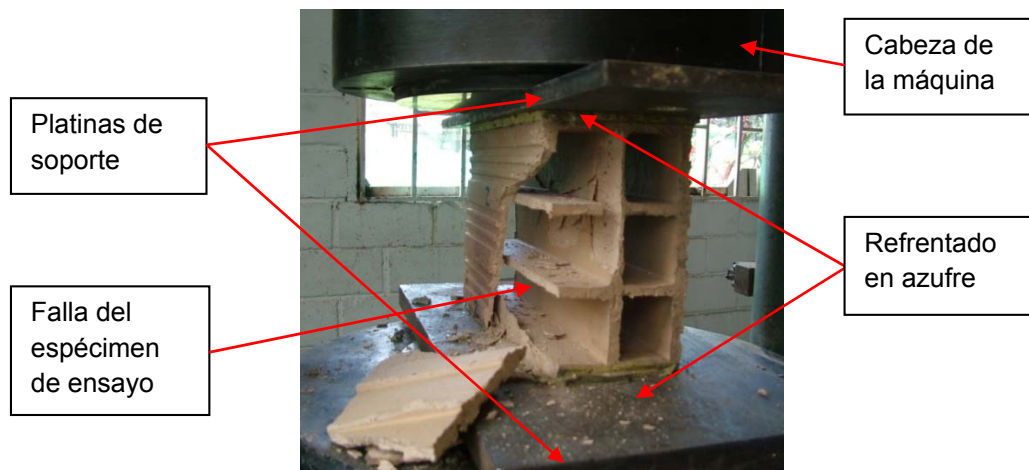


Figura 5-1 Falla de una unidad de mampostería durante el ensayo de resistencia a la compresión
Fuente: El autor

- *Ensayo de Absorción en unidades*

El ensayo absorción en las unidades de mampostería dio como valor promedio un 8%. Los resultados detallados de este ensayo se presentan en el Anexo B de este documento.

- *Ensayo de compresión en muretes (prismas)*

El ensayo de compresión de muretes dio como valor promedio 5.3 MPa. Los resultados detallados de este ensayo se presentan en el Anexo C de este documento. La falla que se presenta en este tipo de especímenes es súbita. La Figura 5-2 muestra la falla de uno de los especímenes durante el ensayo de resistencia a la compresión en muretes.

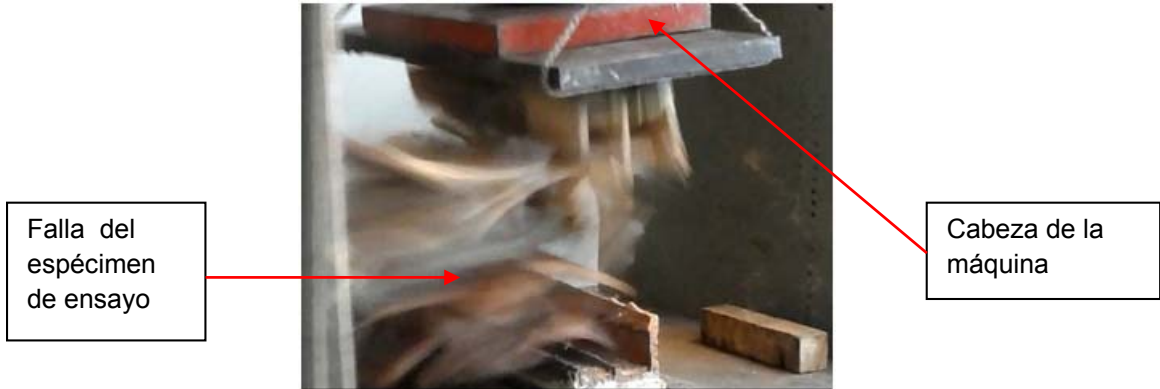


Figura 5-2 Falla de un murete durante del ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: El autor

Si se compara el valor de f'_m obtenido experimentalmente con el obtenido con la Ecuación 3-1 se tiene:

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

$$R_m = \left(\frac{2 * 200}{75 + 3 * 200} \right) 9.8 + \left(\frac{50 * 0.8}{75 + 3 * 200} \right) 20 < 0.8 * 9.8$$

$$R_m = 6.99 < 7.84$$

$$f'_m = 0.75 * 6.99$$

$$f'_m = 5.24 \text{ MPa.}$$

Valor que sólo difiere en 0.4% con respecto al experimental.

- *Ensayo de módulo de elasticidad de la mampostería.*

El módulo de elasticidad promedio obtenido en los ensayos fue de 4231 MPa. Los resultados detallados del ensayo del módulo de elasticidad de la mampostería se presentan en el Anexo D de este documento. Al comparar este valor con el valor teórico calculado con la Ecuación 3-3 se tiene:

$$E_m = 750f'_m \leq 20000 \text{ MPa}$$

$$E_m = 750 * 5.3 \leq 20000 \text{ MPa}$$

$$E_m = 3975 \text{ MPa}$$

En este caso, el valor experimental está un 6.4% por encima del valor teórico. Sin embargo, este porcentaje no es muy alto lo que confirma la buena aproximación de la ecuación teórica en el cálculo de esta propiedad.

5.1.2 Mortero de pega

Los resultados de los ensayos de compresión y fluidez realizados al mortero de pega se presentan a continuación.

- *Ensayo de compresión*

El resultado del ensayo de compresión en cubos de mortero para determinar las proporciones de diseño de la mezcla de mortero para la construcción de los muros se presenta en el Anexo E de este documento. La Figura 5-3 muestra la falla de uno de los cubos de mortero durante el ensayo en mención. La Figura 5-4 presenta los modos de falla obtenidos en los ensayos de compresión.

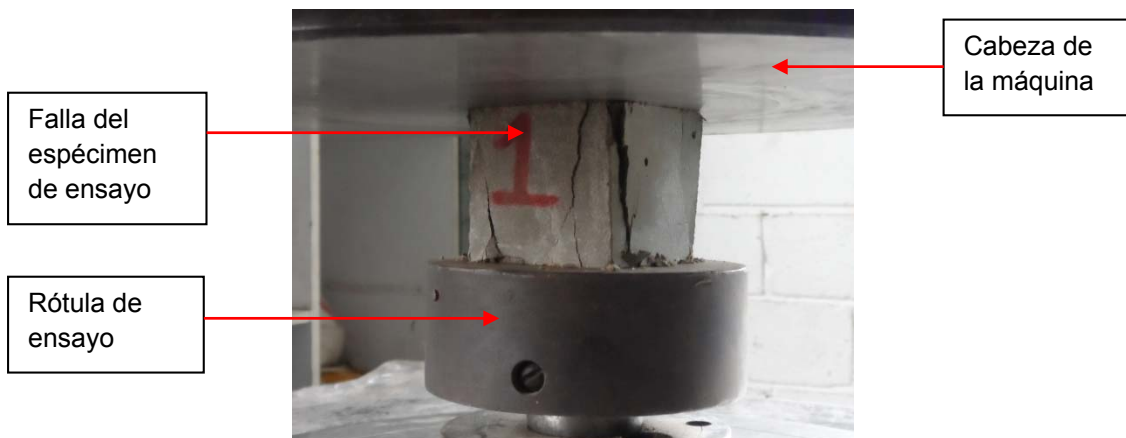


Figura 5-3 Falla de un cubo de mortero durante el ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: El autor





Figura 5-4 Modos de falla obtenidos en los cubos de mortero en el ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: El autor

El resultado del ensayo de compresión en cilindros de mortero, para verificar la resistencia de los morteros utilizados en los muros construidos, se presenta en el Anexo F de este documento. La Figura 5-5 muestra la falla de uno de los cilindros de mortero durante el ensayo en mención. La Figura 5-6 presenta los modos de falla obtenidos en los ensayos de compresión.

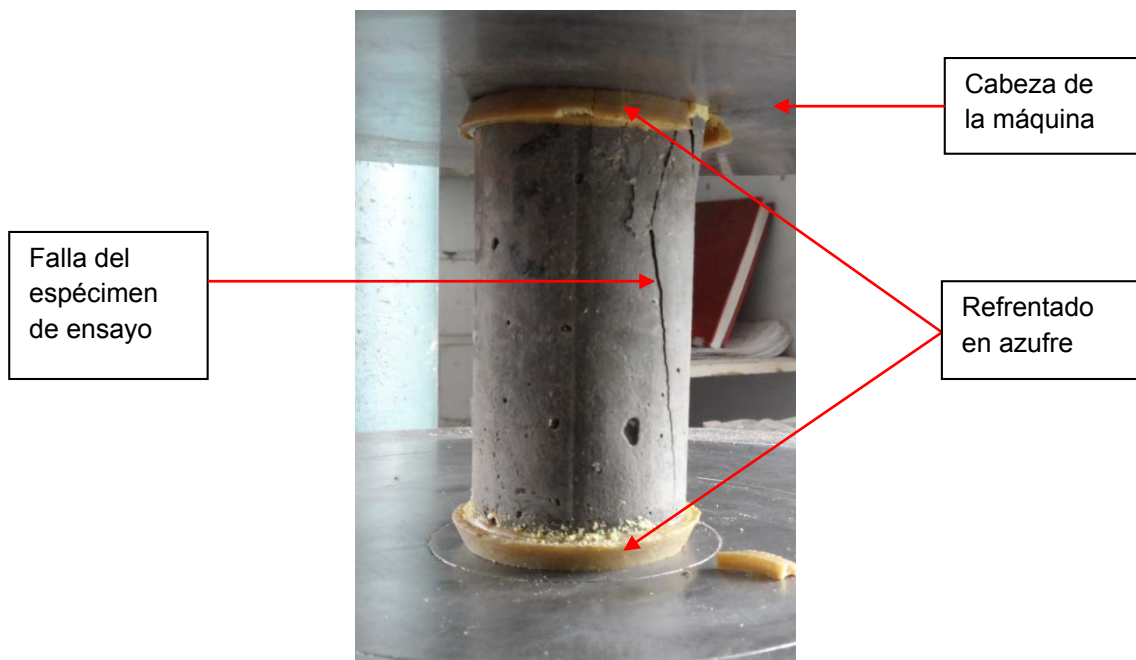


Figura 5-5 Falla de un cilindro de mortero durante el ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: El autor



Figura 5-6 Modos de falla obtenidos en los cilindros de mortero en el ensayo de resistencia a la compresión
Fuente: El autor

▪ *Ensayo de fluidez*

El resultado del ensayo de fluidez en el mortero, para determinar la manejabilidad de la mezcla durante la construcción de los muros, estuvo dentro de los valores establecidos para un mortero tipo M, entre 115 – 125%, obteniendo valores promedios de porcentajes de fluidez de 117%. La Figura 5-7 muestra el montaje y detalle del resultado del ensayo en mención.



a)



b)

Figura 5-7 Realización del ensayo de fluidez en morteros
a) Montaje general b) Detalle de las medidas de los diámetros.

Fuente: El autor

5.1.3 Tejido de fibra de carbono

Las propiedades mecánicas de los tejidos de fibra de carbono y adhesivos epóxicos utilizados en el desarrollo de este proyecto se presentan en el Anexo K de este documento y corresponden a los valores reportados por el fabricante **SIKA COLOMBIA S.A.** en las hojas técnicas de dichos productos.

5.1.4 Concreto

- *Ensayo de compresión*

El resultado del ensayo de compresión en cilindros de concreto, para verificar la resistencia de los concretos utilizados en las vigas de cimentación, vigas de borde superior de los muros y macizos de los sistemas de anclaje, se presenta en el Anexo G de este documento. La Figura 5-8 muestra las fallas de algunos cilindros de concreto durante el ensayo en mención.



Figura 5-8 Fallas de los cilindros de concreto durante el ensayo de resistencia a la compresión. Se destaca la falla cónica. Fuente: El autor

5.2 Resultados y análisis de los sistemas de anclaje

- *Sistema de anclaje No. 1: Corbatines de FRP*

El sistema de anclaje No. 1 no tuvo un buen comportamiento a la hora de garantizar el monolitismo entre la viga de cimentación y el muro de mampostería; presentó una falla por desgarramiento del corbatín en el punto donde se comienza a deshilar la fibra que estaba adherida a la mampostería. Este comportamiento produjo el desprendimiento del muro de su cimentación sin ocasionarle ningún tipo de daño, de manera que no puedo evaluarse el desempeño del material de refuerzo del muro. Las causas de este tipo de falla pudieron deberse a que el muro, al estar sometido a carga lateral, produce una componente de corte en el corbatín, el cual presenta deficiencia ante esta sollicitación, que hace que disminuya su capacidad; adicionalmente, la falta de redundancia del sistema de anclaje (sólo se tenía un corbatín en cada extremo del muro) que ayudara a soportar las sollicitaciones en caso de que uno de los corbatines fallara, también pudo ser causa del inadecuado comportamiento de este anclaje. La Figura 5-9 muestra la falla descrita anteriormente del sistema de anclaje con corbatines de FRP.



Figura 5-9 Falla del sistema de anclaje No. 1.

a) Muro corto fallado, b) y c) Detalle de la falla del corbatín, d) Estado del corbatín al quitar el muro
Fuente: El autor

- *Sistema de anclaje No. 2: Extensión del FRP hasta la cimentación*

El sistema de anclaje No. 2 tampoco tuvo un buen desempeño a la hora de vincular el muro con su cimentación; la sollicitación en el anclaje superó su capacidad de carga máxima presentando un desprendimiento del traslape de fibra realizado con la fibra ya adherida al muro de mampostería acompañada de una falla por tensión en el chaflán de concreto, que hizo que también se desprendiera tanto de la viga de cimentación como del muro debido a la falta de adherencia entre la fibra nueva y la fibra ya curada o una escasa longitud de desarrollo de la fibra. Nuevamente, el muro quedó intacto y no pudo evaluarse la capacidad del material de refuerzo La Figura 5-10 muestra las fallas del sistema de anclaje No. 2.

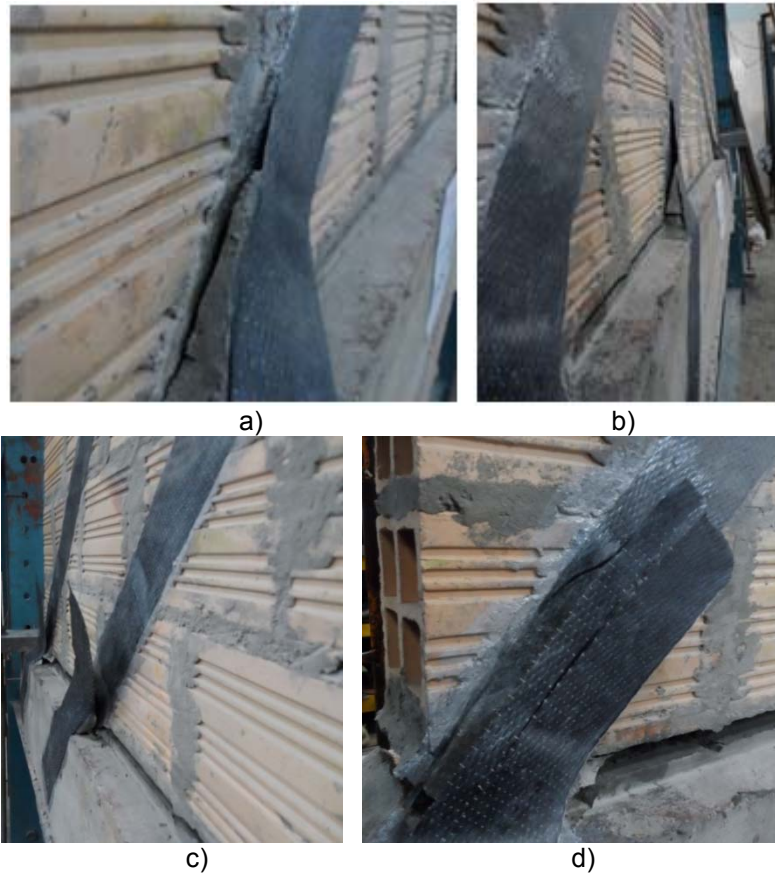


Figura 5-10 Fallas del sistema de anclaje No. 2.

a) y b) Falla por tensión del chaflán, c) y d) Desprendimiento de la fibra en el traslape.

Fuente: El autor

- *Sistema de anclaje No. 3: Macizos de concreto y extensión del FRP hasta el macizo.*

El sistema de anclaje No. 3 tuvo un mejor comportamiento y su capacidad de carga última fue superior a la de los sistemas anteriores ya descritos; sin embargo, a pesar de esta mejoría, no se alcanzó la resistencia requerida del anclaje y nuevamente el muro se desvinculó de su cimentación; también se presentó un desprendimiento de la fibra, pero esta vez del macizo de concreto quien también sufrió una falla por tensión que lo hizo desprenderse del muro de mampostería. Al igual que el sistema No. 2, la falta de adherencia, en este caso entre la fibra y el macizo de concreto, pudieron afectar el adecuado comportamiento que se alcanzó a lograr con este sistema de anclaje. La Figura 5-11 muestra las fallas del sistema de anclaje No. 3.

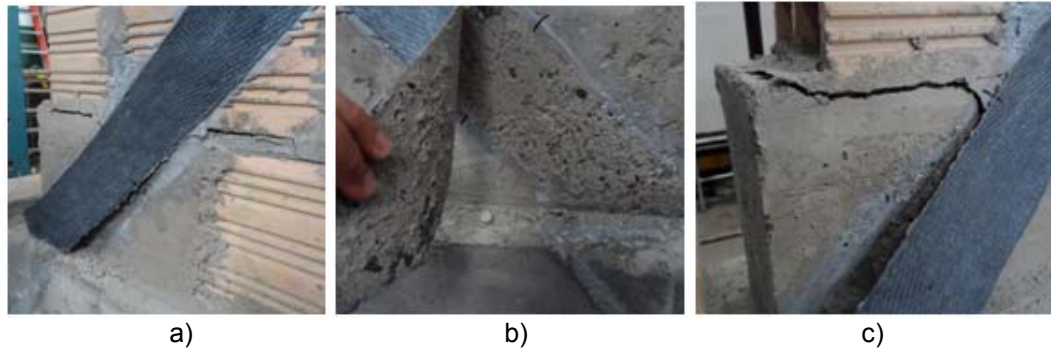


Figura 5-11 Fallas del sistema de anclaje No. 3.

a) y b) Desprendimiento de la fibra del macizo c) Falla por tensión del macizo

Fuente: El autor

- *Sistema de anclaje No. 4: Macizos de concreto con el FRP pasando a través del macizo.*

El sistema de anclaje No. 4 fue el de mejor comportamiento en el momento de garantizar el monolitismo entre el muro y la viga de cimentación; en este tipo de anclaje se logró una capacidad de carga superior al del material de refuerzo del muro, se presentó una falla por ruptura de la fibra en la zona por donde esta atraviesa el macizo de concreto al otro lado del muro, por lo tanto este último sistema de anclaje, fue considerado como óptimo, para estos especímenes de estudio, dado que al fallar la fibra se cumplió con el objetivo de que dicho material de refuerzo trabajara a su máxima capacidad. La Figura 5-12 muestra las fallas de la fibra en el sistema de anclaje No. 4.



Figura 5-12 Falla de la fibra en el sistema de anclaje No. 4.

Ruptura de la fibra en la zona donde atraviesa el macizo

Fuente: El autor

Después de analizar los resultados obtenidos en cada uno de los sistemas de anclaje estudiados, se consideró que el sistema de anclaje No. 4 cumplía satisfactoriamente con los objetivos de la investigación, razón por la cual, el desarrollo de la misma se continuó con esta solución.

5.3 Resultados y análisis de los ensayos monotónicos

En la Figura 5-13 se presentan los modos de falla obtenidos en los muros no reforzados; una descripción cualitativa muestra que los especímenes sin refuerzo (SR-C-1-ES y SR-L-1-ES), presentaron una falla controlada por la flexión (Figura 2-19 c), en donde los esfuerzos de tensión fueron superiores a la adherencia entre el mortero de pega y las unidades de mampostería generando un desprendimiento del muro en una de las primeras hiladas y el correspondiente aplastamiento de algunas unidades en la zona de compresión del muro.

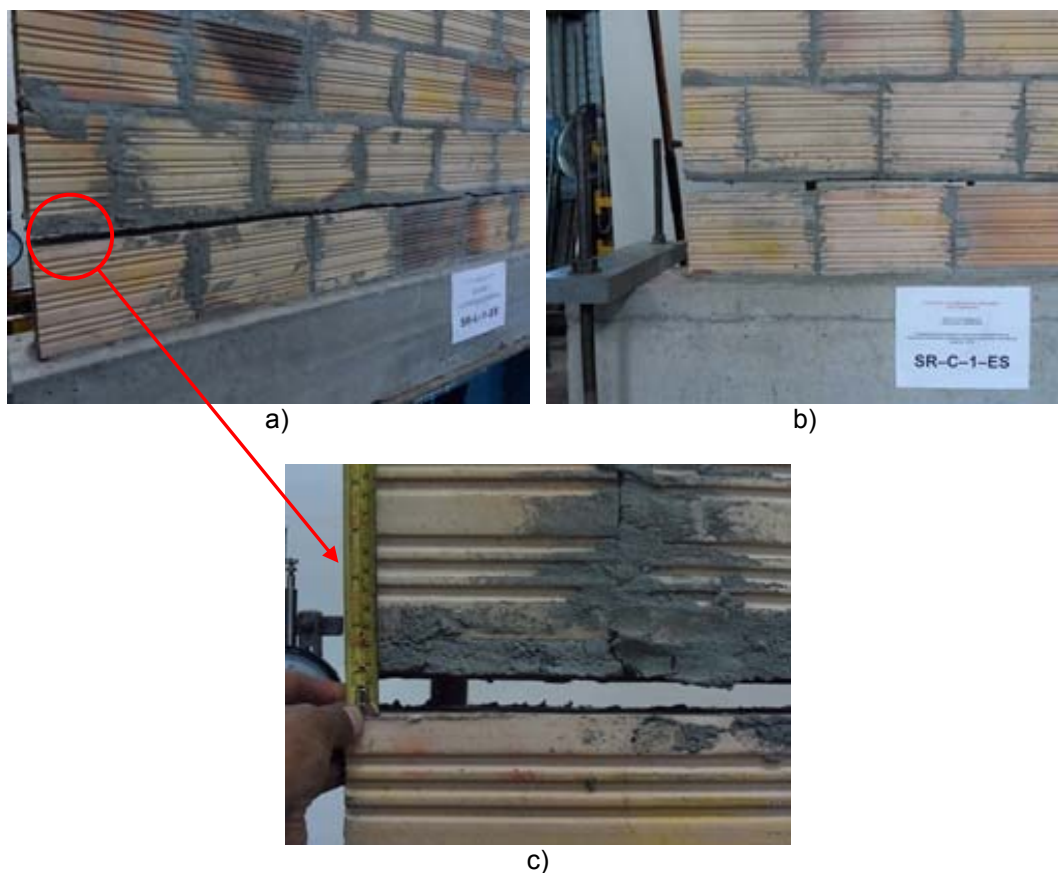


Figura 5-13 a) y b) Modos de falla de los especímenes no reforzados; c) Detalle del desprendimiento de una de las hiladas
Ensayos monotónicos. Fuente: El autor.

Al estar los muros reforzados estos presentan diferentes tipos de falla; a continuación se presenta una descripción de la falla obtenida en cada uno de los especímenes prueba.

Los muros R-D-L-1-ES, R-D-L-2-ES, R-D-L-3-ES y R-G-C-1-ES, fueron utilizados en el análisis y comportamiento de los diferentes sistemas de anclaje estudiados, por consiguiente la falla en estos elementos se presentó en su sistema de anclaje y los resultados se muestran en el numeral 5.2 del presente documento.

- *Muro R-D-L-4-ES*

El muro R-D-L-4-ES presenta una grieta principal en forma de escalera iniciada debajo de la altura media del muro, en la zona de tensiones, pasando por el material de refuerzo hasta llegar a la primera hilada de ladrillos (Figura 5-14 a); adicional a esta grieta se presenta una delaminación y desprendimiento (Pull off) de la fibra del muro superando en algunos puntos la resistencia de los ladrillos produciendo fracturas en los mismos (Figura 5-14 b). Finalmente, en la zona del anclaje se presenta la rotura de la fibra logrando de esta manera la máxima eficiencia de la misma (Figura 5-14 c, d y e).

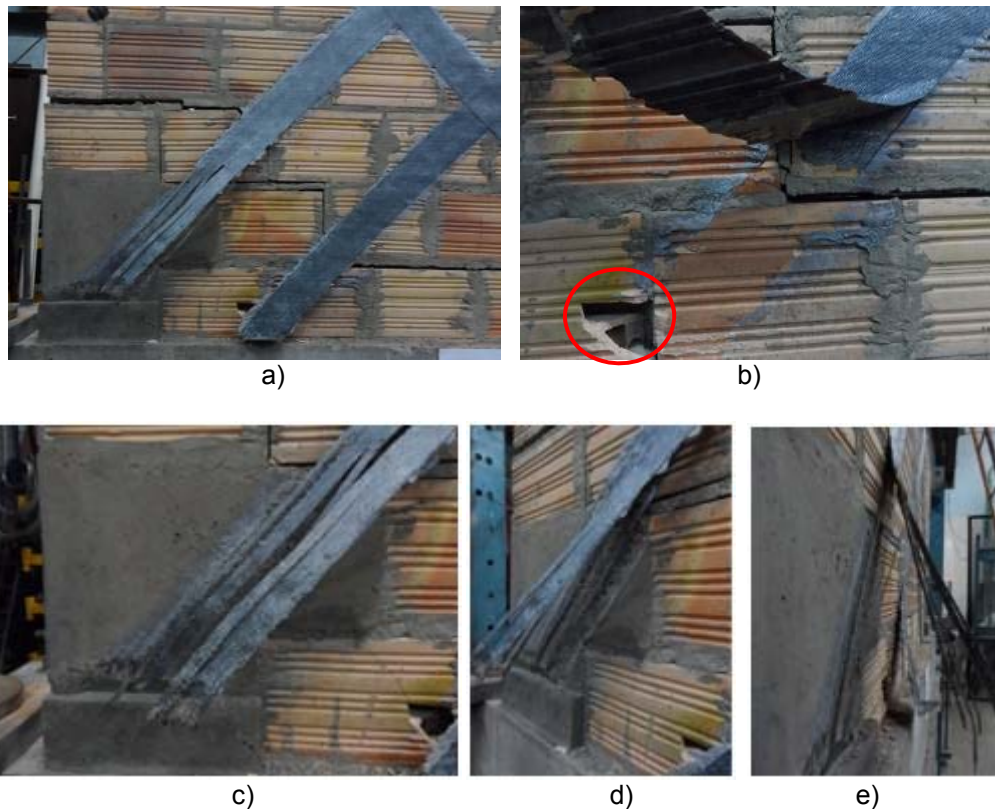


Figura 5-14 Modos de falla del espécimen R-D-L-4-ES.

Fuente: El autor.

- *Muro R-G-C-2-ES*

La Figura 5-15 presenta el montaje del muro R-G-C-2-ES durante el ensayo monotónico. Este espécimen presenta una grieta principal horizontal a lo largo de la segunda junta de pega acompañada de una falla por tensión en el sistema de anclaje, en la junta de construcción de los dos concretos de edades diferentes (Figura 5-16 a) y la rotura de algunas unidades de mampostería en la misma zona (Figura 5-16 b). En la Figura 5-16 c y d se muestra un detalle de la falla del anclaje de este espécimen.



Figura 5-15 Montaje del ensayo monotónico del espécimen R-G-C-2-ES.
Fuente: El autor.

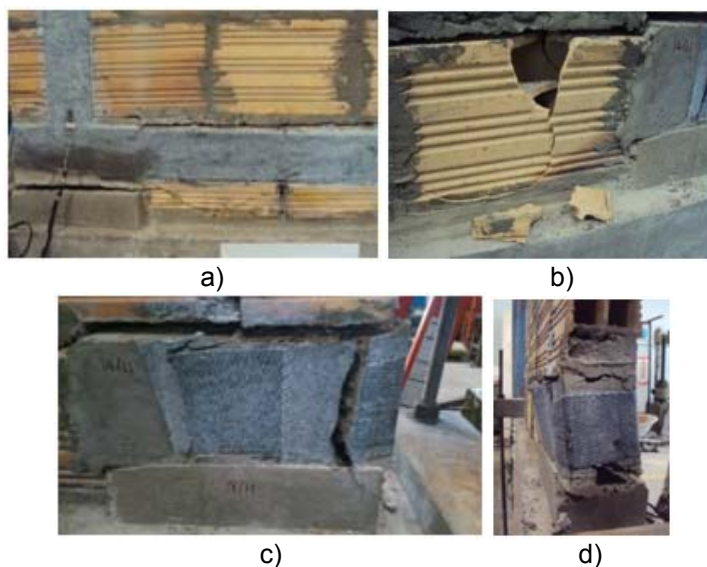


Figura 5-16 Modos de falla del espécimen R-G-C-2-ES.
Fuente: El autor.

5.3.1 Capacidad de carga de los muros en los ensayos monotónicos

En la Tabla 5-1 se encuentran consignados los resultados de carga máxima resistida por cada uno de los muros, para los diferentes sistemas de anclaje estudiados, en los ensayos monotónicos. Los resultados evidencian como la capacidad de carga máxima de los muros está muy relacionada con el sistema de anclaje y en la medida en que este tenga un mejor comportamiento, dicha capacidad será mucho mayor. En los muros cortos se observa como el muro con el sistema de anclaje No. 4 alcanzó una resistencia superior a 4.0 veces la del muro con el sistema de anclaje No. 1; resultado similar se encontró en los muros largos donde pasó de 12.5 kN con el anclaje No. 1 a 40.9 kN con el anclaje No. 4, un aumento de 3.7 veces.

Tabla 5-1 Cargas máximas obtenidas en los ensayos monotónicos

ESPÉCIMEN N°	ESPÉCIMEN REFORZADO	CONFIGURACIÓN REFORZAMIENTO	TIPO DE ESPÉCIMEN	CÓDIGO DE IDENT.	SISTEMA DE ANCLAJE No.	CARGA MÁX. (kN)	FALLA
1	No	-	Corto	SR-C-1	-	1,3	FF-GP
2	No	-	Largo	SR-L-1	-	8,2	FF-GP
3	Si	Grilla	Corto	R-G-C-1	1	5,6	GP-RC
4	Si	Grilla	Corto	R-G-C-2	4	23,4	GP
5	Si	Diagonal	Largo	R-D-L-1	1	12,5	GP-RC
6	Si	Diagonal	Largo	R-D-L-2	2	9,7	GP-PO
7	Si	Diagonal	Largo	R-D-L-3	3	16,1	GP-PO
8	Si	Diagonal	Largo	R-D-L-4	4	40,9	GP-PO-DF-RF

FF = Falla Frágil

RF = Rotura de la fibra

GP = Grieta principal

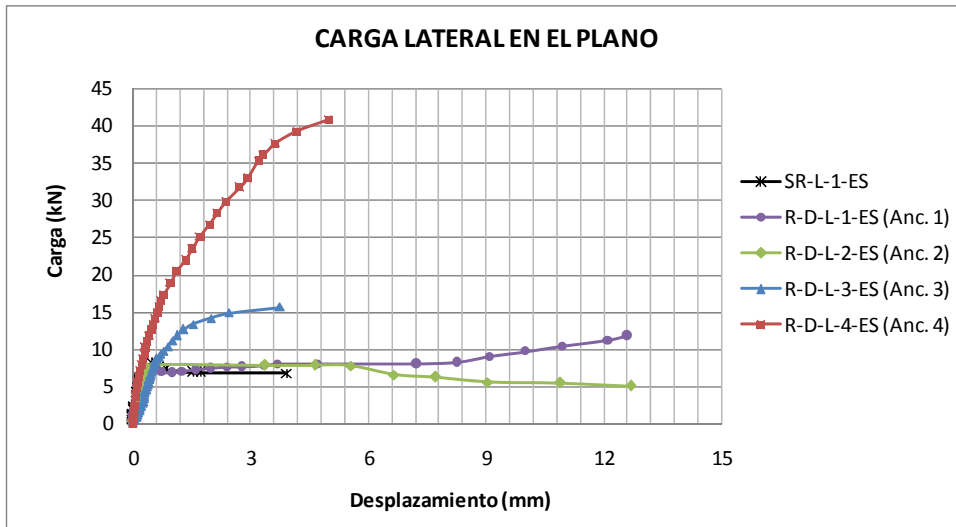
DF = Delaminación de la Fibra

PO = Pull off

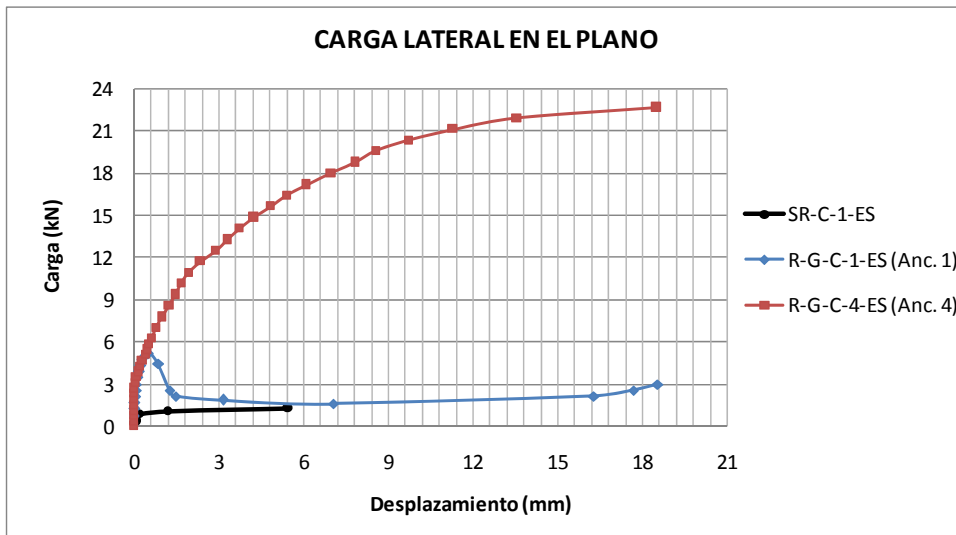
RC = Rotura del corbatín

La Figura 5-17 presenta en las ordenadas la carga resistida por cada espécimen de prueba durante el ensayo monotónico y en las abscisas, el desplazamiento lateral registrado. Como se puede observar, los sistemas de anclaje No. 1 y No. 2 en los muros largos y No. 1 en los cortos, no evidencian un alto aumento en la resistencia pero si en su deformación lateral, indicando con esto un desplazamiento relativo entre la cimentación y el muro lo que representa una deficiencia en estos sistemas de anclaje, ya que la fibra no transmite carga a la cimentación; el anclaje No. 3 en los muros largos, a pesar de mejorar un poco la capacidad de carga última también presentó deficiencias similares. En los muros largos reforzados en diagonal se evidencia un importante aumento de la resistencia ante carga lateral del muro reforzado con el sistema de anclaje No. 4 alcanzando resistencias de hasta 5.0 veces al compararlo con el muro sin refuerzo, lo cual garantiza una mayor eficiencia

para el sistema en general. En el caso del muro corto reforzado en grilla, se presenta un comportamiento mucho más eficiente alcanzando una resistencia de hasta 18 veces el muro sin refuerzo; el sistema de anclaje No. 4 es ampliamente superior, en este caso únicamente al sistema de anclaje No. 1, incluso en el desplazamiento lateral ya no queda tan rezagado como en los muros largos.



a)



b)

Figura 5-17 Carga vs Desplazamiento ensayos monotónicos.
a) Muros largos; b) Muros cortos

5.4 Resultados y análisis de los ensayos dinámicos (Cíclicos)

5.4.1 Modos de falla de los muros

A continuación se presenta una descripción cualitativa de los modos de falla obtenidos en cada uno de los muros de prueba sometidos al ensayo dinámico.

- *Muro R-D-C-1-DI*

La Figura 5-18 muestra el montaje del muro R-D-C-1-DI para el ensayo dinámico; este espécimen presentó una falla por flexión en su base generando el desprendimiento de las juntas de pega de las primeras hiladas y el posterior rompimiento de las unidades de mampostería debido a los esfuerzos de compresión producidos; la fibra de carbono presenta una rotura en la zona del anclaje junto con un desprendimiento (Pull off) del muro produciendo fracturas por tensión en algunas unidades. Las grietas generadas se encuentran principalmente en las juntas de pega y algunas pequeñas grietas en las unidades de mampostería de la base del muro; el anclaje en uno de los extremos también presentó una serie de grietas por tensión que afectó la capacidad de resistencia del espécimen. En la Figura 5-19 se muestran las fallas descritas anteriormente.



Figura 5-18 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R-D-C-1-DI.
Fuente: El autor.



Rompimiento de unidades de mampostería, desprendimiento y rotura de la fibra



Falla por tensión del anclaje



Fractura de unidades por la adherencia con la fibra



Detalle de la rotura de la fibra en el anclaje

Figura 5-19 Fallas del espécimen R-D-C-1-DI

Fuente: El autor.

- *Muro R-D-C-2-DI*

La Figura 5-20 muestra el montaje del muro R-D-C-2-DI para el ensayo dinámico. Cabe aclarar que este espécimen inicialmente tenía una configuración de reforzamiento similar a la del muro R-D-C-1-DI; sin embargo al observar el tipo de falla de dicho espécimen se optó por colocar un refuerzo adicional por flexión que consistió en dos tiras verticales de 10 cm de ancho en los extremos del muro; es importante tener en cuenta que ese refuerzo adicional no fue anclado como el resto del refuerzo debido a que el macizo de concreto en el anclaje ya estaba construido y se hubiera tenido que demoler para poder anclar dicha fibra; por esta razón se extendió el refuerzo hasta el macizo como se explicó en el sistema de anclaje No. 3.



Figura 5-20 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R-D-C-2-DI.
Fuente: El autor

A pesar del refuerzo adicional colocado, el espécimen R-D-C-2-DI presentó una falla por flexión en su base generando el desprendimiento del muro en la segunda junta de pega, en este caso no hubo unidades de mampostería trituradas gracias al refuerzo vertical adicional que se colocó; la fibra de carbono presentó rotura en una de las zona de anclaje junto con un desprendimiento (Pull off) del muro produciendo la delaminación de la fibra en algunos puntos, el refuerzo adicional también se desprendió del anclaje similar a como se presentó la falla del sistema de anclaje No. 3, lo cual reafirma la importancia de anclar adecuadamente este material para que trabaje a su máxima capacidad; se produjo una grieta principal horizontal por la pega de la segunda hilada y una serie de grietas pequeñas en algunas unidades sin producirse la destrucción de las mismas. Aunque la fibra no se rompió en ambos anclajes, el desprendimiento del muro en dicha hilada afectó su capacidad de resistencia. En la Figura 5-21 se muestran las fallas descritas anteriormente.

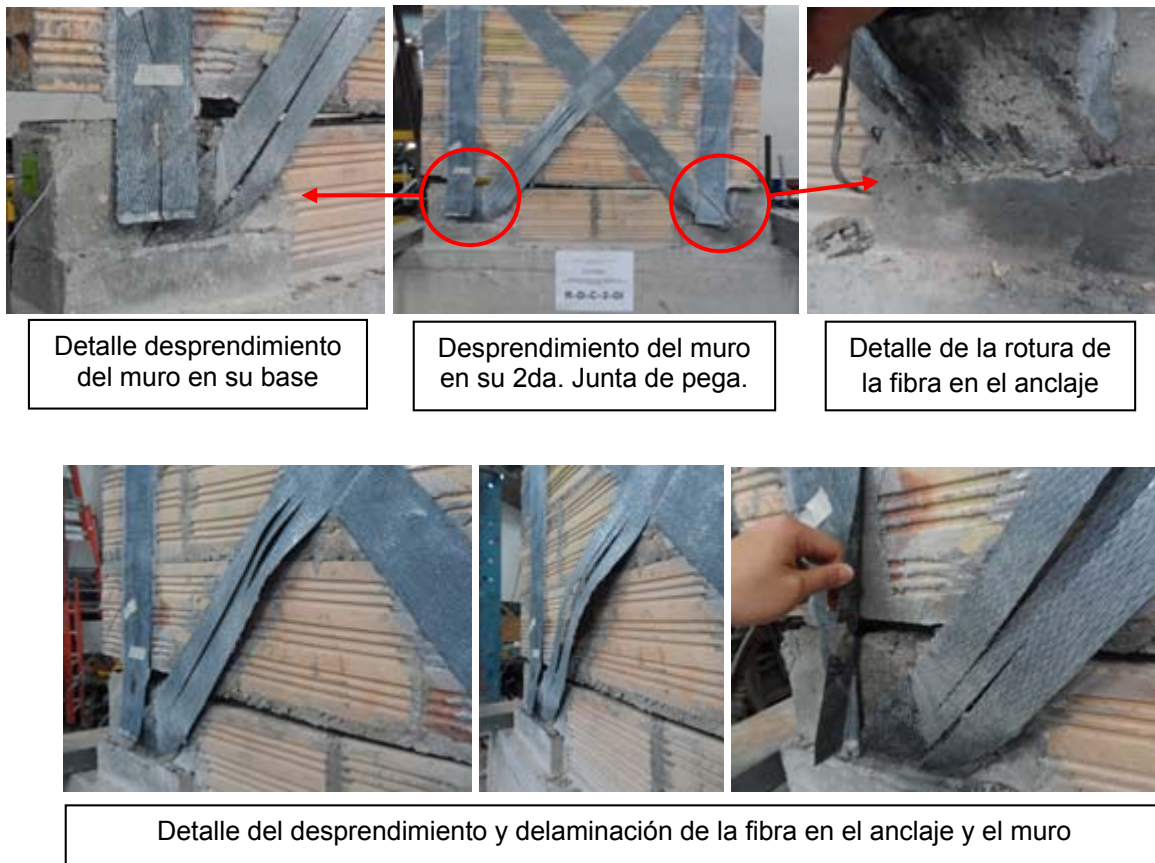


Figura 5-21 Fallas del espécimen R-D-C-2-DI
Fuente: El autor

- *Muro R-G-C-1-DI*

La Figura 5-22 muestra el montaje del muro R-G-C-1-DI para el ensayo dinámico; este espécimen presentó una falla por flexión en su base, específicamente en la junta de construcción de los dos concretos de edades diferentes del anclaje y se presentaron una serie de grietas por tensión en algunas unidades de la base del muro; adicionalmente se produjo una falla por adherencia entre la viga de borde superior y la última hilada de ladrillos generando el rompimiento de algunas unidades y el desprendimiento parcial de dicho elemento del muro; esta falla considerada atípica para el ensayo, finalmente disminuyó la capacidad de carga del espécimen y debido a este comportamiento, la fibra de carbono no presentó una falla visible que pudiera describir de una mejor manera el desempeño del muro frente a las sollicitaciones a las que estaba sometido. Como consecuencia de este problema, fue necesario anclar el refuerzo de los demás especímenes de prueba a la viga de borde superior siguiendo el procedimiento del sistema de anclaje No. 4. En la Figura 5-23 se muestran las fallas descritas anteriormente.



Figura 5-22 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R-G-C-1-DI.
Fuente: El autor



Figura 5-23 Fallas del espécimen R-G-C-1-DI

Fuente: El autor.

- Muro R-D-L-1-DI

La Figura 5-24 muestra el montaje del muro R-D-L-1-DI para el ensayo dinámico.



Figura 5-24 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R-D-L-1-DI.

Fuente: El autor

El espécimen R-D-L-1-DI presentó una grieta principal en forma de escalera iniciada en la altura media del muro hasta la base del mismo; a pesar de que la forma de este tipo de grietas suele representar una falla por corte, la rotura de la fibra en la zona del anclaje y el rompimiento de algunas unidades de mampostería debido a los esfuerzos de compresión producidos indican que la falla principalmente se produce por flexión. El material de refuerzo presenta una delaminación en sus fibras así como un desprendimiento (Pull off) del muro produciendo fracturas por tensión en algunas unidades debido a la adherencia entre la fibra y las unidades. En la Figura 5-25 se muestran las fallas descritas anteriormente.



Fallas en unidades y material de refuerzo del espécimen R-D-L-1-DI



Rotura y arrancamiento de la fibra en el anclaje

Delaminación y arrancamiento de la fibra



Rotura de unidades por la adherencia con la fibra

Figura 5-25 Fallas del espécimen R-D-L-1-DI

Fuente: El autor

- *Muro R-D-L-2-DI*

La Figura 5-26 muestra el montaje del muro R-D-L-2-DI para el ensayo dinámico. Es importante anotar que este espécimen inicialmente tenía una configuración de reforzamiento similar a la del muro R-D-L-1-DI pero siguiendo las mismas razones del muro R-D-C-2-DI también se colocó un refuerzo adicional vertical por flexión; al igual que el espécimen corto, este refuerzo adicional tampoco fue anclado al macizo de concreto del anclaje y únicamente se extendió hasta el mismo como se explicó en el sistema de anclaje No. 3. Este espécimen presentó una grieta principal en forma de escalera desarrollada en la altura media del muro; como ya se dijo anteriormente este tipo de grietas son representativas de una falla por corte, sin embargo, nuevamente la rotura de la fibra en la zona del anclaje y el rompimiento de algunas unidades de mampostería indican que la falla principalmente se produce por flexión. El material de refuerzo presenta una delaminación en sus fibras así como un desprendimiento o arrancamiento (Pull off) del muro produciendo fracturas por tensión en algunas unidades debido a la adherencia entre la fibra y las unidades; a pesar de que el refuerzo adicional fue de ayuda a la hora de evitar fisuras horizontales en las juntas de pega de las unidades así como el rompimiento de estas, también tuvo lugar un desprendimiento del macizo como en la falla del sistema de anclaje No. 3 y no alcanzó su máximo desempeño. En la Figura 5-27 se muestran las fallas descritas anteriormente.



Figura 5-26 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R-D-L-2-DI.
Fuente: El autor



Fallas en unidades y material de refuerzo del espécimen R-D-L-2-DI



Detalle del arrancamiento (Pull off) de la fibra



Detalle de rotura y delaminación de la fibra

Detalle grieta principal en escalera



Rotura de unidades por la adherencia con la fibra

Figura 5-27 Fallas del espécimen R-D-L-2-DI

Fuente: El autor

- *Muro R-G-L-1-DI*

La Figura 5-28 muestra el montaje del muro R-G-L-1-DI para el ensayo dinámico; este espécimen presentó una falla por flexión en su base generando el rompimiento de unidades de mampostería por los esfuerzos de compresión y grietas principales horizontales en la primera junta de pega y entre los macizos de concreto y el muro; esta última falla entre estos dos elementos produjo un desplazamiento del muro con respecto a uno de los macizos del anclaje que finalmente disminuyó la capacidad de carga del espécimen; debido a este comportamiento el material de refuerzo no pudo trabajar a su máxima capacidad y sólo presentó una pequeña falla por adherencia en la zona del macizo de concreto. En la Figura 5-29 se muestran las fallas descritas anteriormente.



Figura 5-28 Montaje del ensayo dinámico del espécimen R-G-L-1-DI.
Fuente: El autor

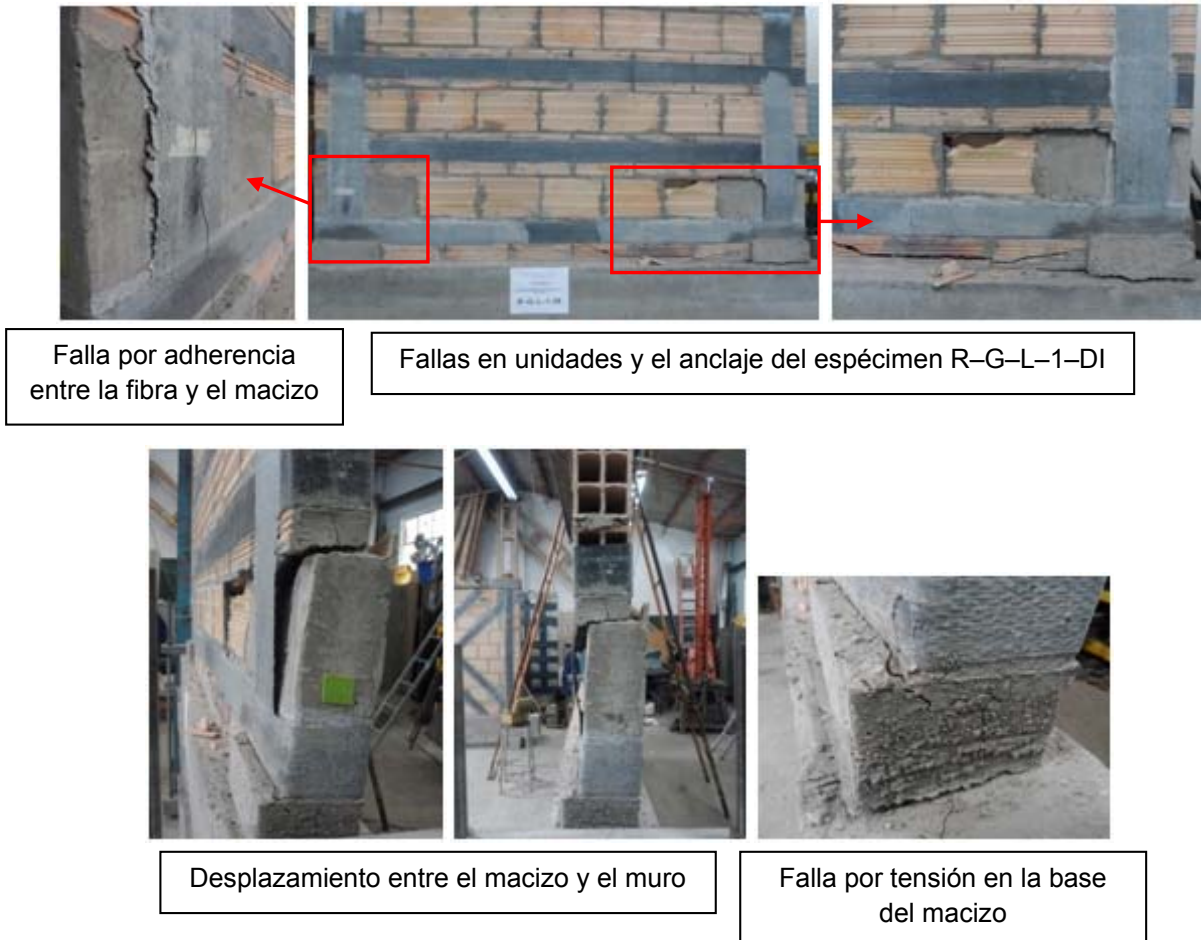


Figura 5-29 Fallas del espécimen R-G-L-1-DI
Fuente: El autor

5.4.2 Capacidad de carga de los muros en los ensayos cíclicos

En la Tabla 5-2 se encuentran consignados los resultados de carga máxima resistida por cada uno de los muros, con su respectiva falla, durante el ensayo dinámico, también se presentan los resultados de los muros no reforzados ya mostrados en la Tabla 5-1 con el fin de hacer comparaciones. Los resultados muestran como la capacidad de carga de los muros depende de diferentes factores, el primero de ellos es el tamaño de los especímenes; aunque desde el punto de vista geométrico los muros denominados largos tienen el doble de longitud que los muros denominados cortos, esa relación 2:1 en su longitud no se mantiene en el valor de carga máxima; para los muros sin refuerzo dicho valor está en una proporción 6.3:1 y para los reforzados, la configuración en diagonal está en 3.5:1 y la de grilla en 2.7:1. Esto indica que la capacidad de resistencia de este tipo de

elementos no tiene una relación directa o preestablecida con la geometría de los mismos sino que depende mucho de material de refuerzo que tenga así como de su orientación.

Tabla 5-2 Cargas y fallas obtenidos en los ensayos dinámicos

ESPÉCIMEN N°	ESPÉCIMEN REFORZADO	CONFIGURACIÓN REFORZAMIENTO	TIPO DE ESPÉCIMEN	TIPO DE ENSAYO	CÓDIGO DE IDENT.	CARGA MÁX. (kN)	FALLA
1	No	-	Corto	Estático	SR-C-1-ES	1,3	FF-GP
2	No	-	Largo	Estático	SR-L-1-ES	8,2	FF-GP
3	Si	Diagonal	Corto	Dinámico	R-D-C-1-DI	16,5	PO-RF-FF
4	Si	Diagonal	Corto	Dinámico	R-D-C-2-DI	16,6	GP-PO-DF-RF
5	Si	Diagonal	Largo	Dinámico	R-D-L-1-DI	56,7	GP-PO-DF-RF
6	Si	Diagonal	Largo	Dinámico	R-D-L-2-DI	58,1	GP-PO-DF-RF
7	Si	Grilla	Corto	Dinámico	R-G-C-1-DI	24,4	GP
8	Si	Grilla	Largo	Dinámico	R-G-L-1-DI	66,6	GP-PO

FF = Falla frágil

RF = Rotura de la fibra

GP = Grieta principal

DF = Delaminación de la fibra

PO = Pull off

El segundo factor a analizar es la configuración de reforzamiento; según los resultados obtenidos se observa que el reforzamiento en grilla presenta valores más altos en la capacidad de carga y esfuerzo máximo que los especímenes con una configuración en diagonal; con respecto a los muros cortos sin ningún material de refuerzo los especímenes reforzados tuvieron un aumento en su resistencia de hasta 12.8 veces en la configuración en diagonal y 18.8 en la configuración en grilla; para los muros largos estos valores fueron de 7.1 y 8.1 para las configuraciones en diagonal y grilla respectivamente; esto demuestra que, independientemente del valor en que aumente la resistencia dependiendo de la configuración que se utilice, el material de refuerzo mejora sustancialmente la resistencia y desempeño de este tipo de elementos frente a las sollicitaciones estudiadas. Aunque a simple vista la configuración de refuerzo en grilla parece ser más eficiente en este aspecto, más adelante se presentará un factor en donde la configuración en diagonal resulta ser un poco mejor. Finalmente, el tercer factor que se puede analizar está relacionado con las mejoras que se le quiso hacer a los muros con la configuración en diagonal; a pesar de que se colocó un refuerzo adicional para mejorar la capacidad de carga en estos especímenes los resultados mostraron únicamente un leve aumento en la resistencia (0.6% en los muros cortos y 2.5% en los largos). Según los modos de falla de estos elementos descritos en el numeral 5.4.1 de este documento, para haber alcanzado esa mejora en esa capacidad de carga era necesario haber anclado ese material de refuerzo a los macizos de concreto tal y como se hizo con el primer refuerzo colocado; sin embargo

es importante resaltar que aunque no se tuvo un aumento significativo en la resistencia, como se esperaba, si se mejoró la forma de falla ya que fue menos frágil en este elemento.

La Tabla 5-3 presenta un factor importante que también permite calificar la eficiencia de las configuraciones de reforzamiento; este factor relaciona la capacidad de carga máxima y el área de material de refuerzo utilizado en cada uno de los especímenes; cabe aclarar que este factor al ser una relación entre carga y área no tiene nada que ver con el cálculo de algún valor de esfuerzo en el elemento o el material de refuerzo, simplemente es un valor numérico adimensional utilizado para hacer dicha calificación.

Tabla 5-3 Relación entre carga máxima y área de refuerzo

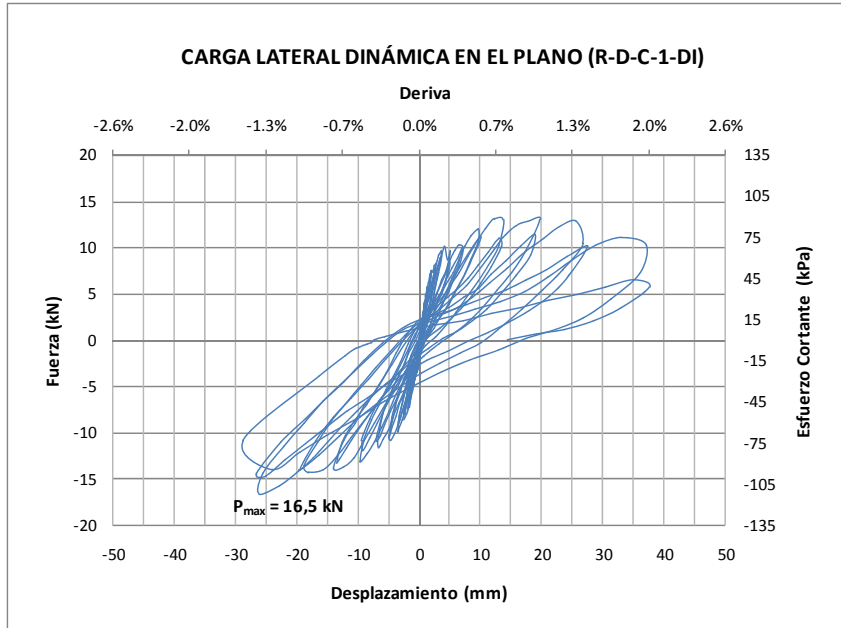
ESPÉCIMEN N°	CONFIGURACIÓN REFORZAMIENTO	TIPO DE ESPÉCIMEN	CÓDIGO DE IDENT.	ÁREA REF. (m ²)	CARGA MÁX. (kN)	RELACIÓN P_{MAX}/A_{REF} (x10)
1	Diagonal	Corto	R-D-C-1-DI	0.80	16.5	2.1
2	Diagonal	Corto	R-D-C-2-DI	1.25	16.6	1.3
3	Diagonal	Largo	R-D-L-1-DI	1.10	56.7	5.2
4	Diagonal	Largo	R-D-L-2-DI	1.47	58.1	4.0
5	Grilla	Corto	R-G-C-1-DI	1.23	24.4	2.0
6	Grilla	Largo	R-G-L-1-DI	2.08	66.6	3.2

Los resultados de la Tabla 5-3 muestran que en este caso la configuración de reforzamiento en diagonal para los muros largos resulta ser más eficiente que la configuración en grilla con valores de P_{MAX}/A_{REF} de 5.2 frente a un 3.2; para los muros cortos se observa que dicha relación también alcanza a ser un poco mayor (2.1 frente a 2.0), sin embargo si se compara con el valor de 1.3 obtenido en el espécimen R-D-C-2 DI, la configuración en grilla para los muros cortos resulta ser más eficiente; en este caso el material de refuerzo adicional colocado a ese espécimen lo afectó en este factor ya que el aumento en el área de refuerzo no se vio reflejado en un aumento en su resistencia.

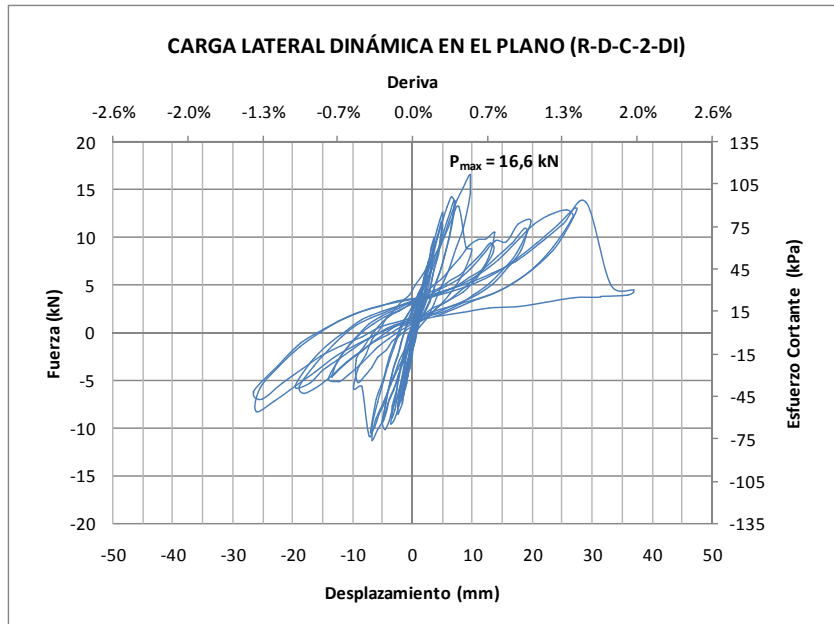
Finalmente, es importante resaltar que ambas configuraciones de reforzamiento tienen sus ventajas y desventajas; la configuración en diagonal tiene un mejor costo beneficio en cuanto a resistencia máxima pero presenta fallas más frágiles, contrario a la configuración en diagonal que tiene fallas más progresivas pero requiere de una mayor cuantía de refuerzo.

5.4.3 Respuesta histerética

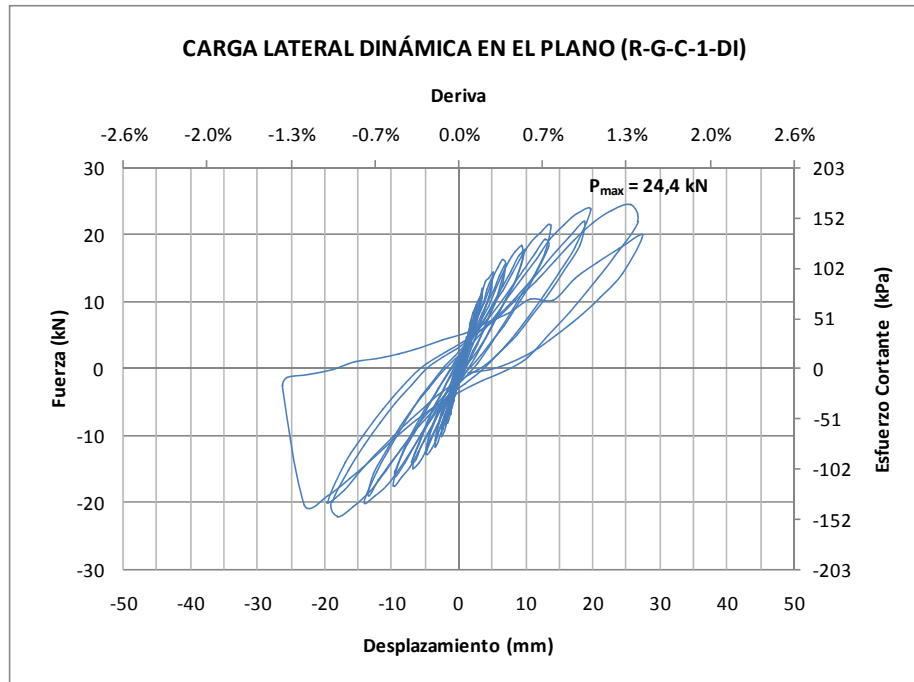
En la Figura 5-30 se presentan las curvas de histéresis de cada uno de los especímenes de prueba ensayados bajo carga lateral dinámica; los gráficos muestran en las ordenadas la carga y el esfuerzo cortante a los que fueron sometidos los muros y en las abscisas los desplazamientos producidos; también se presenta el valor de carga máxima resistido por cada espécimen.



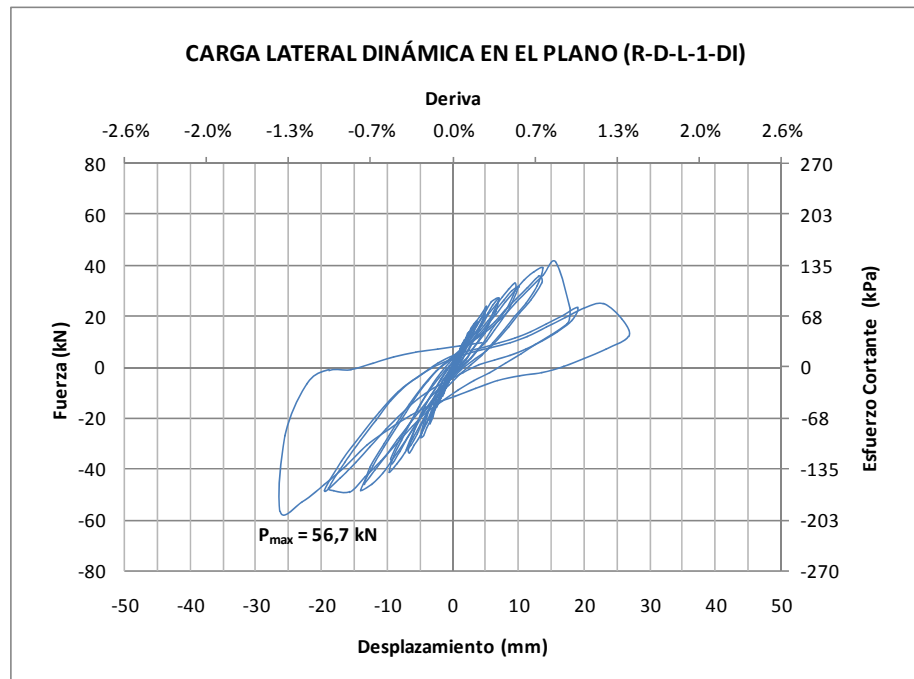
a)



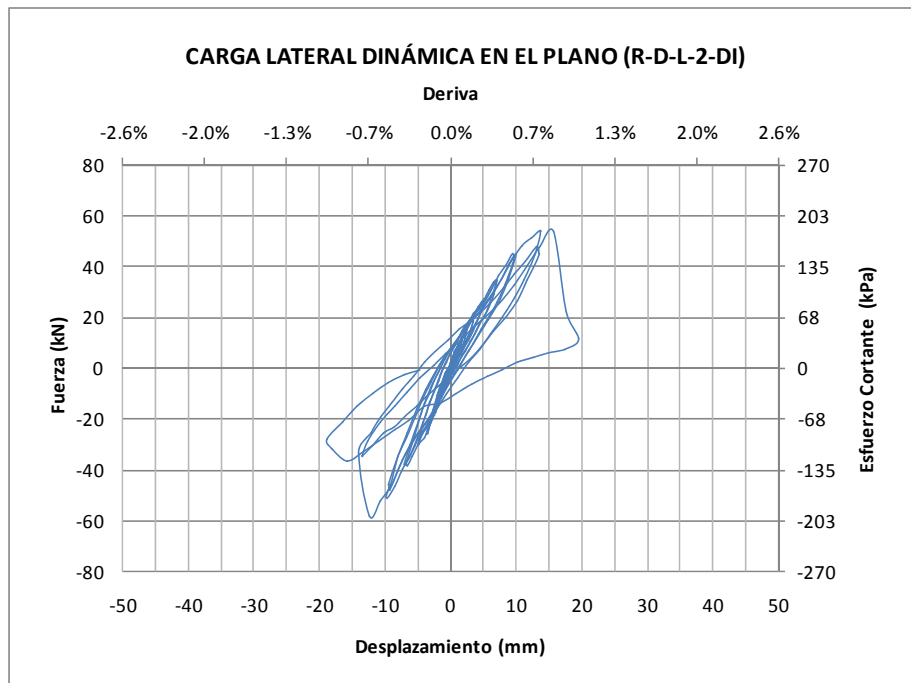
b)



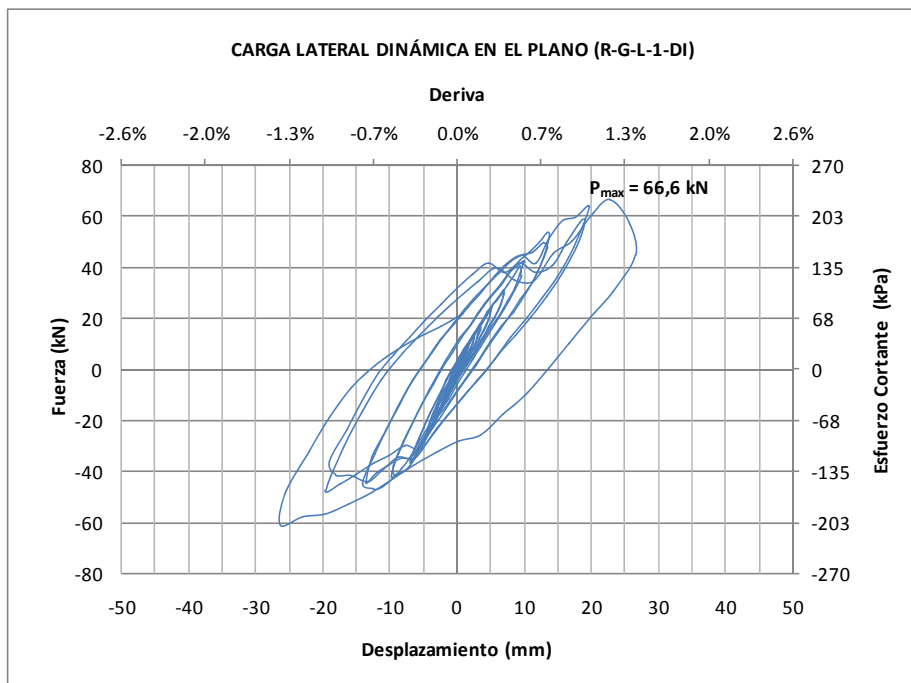
c)



d)



e)



f)

Figura 5-30 Curvas de histéresis de los muros de prueba
Fuente: El autor

Con el fin de realizar comparaciones entre las curvas, en la Figura 5-31 y 5-32 se presentan las envolventes de los ciclos de histéresis presentados en la Figura 5-30 para los muros cortos y largos respectivamente.

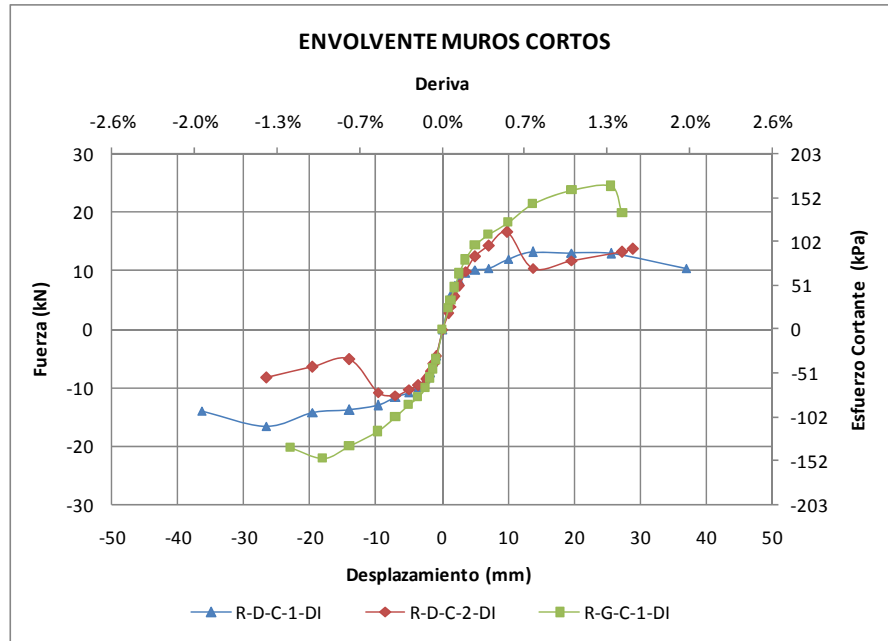


Figura 5-31 Envolvente de ciclos de histéresis muros cortos
Fuente: El autor

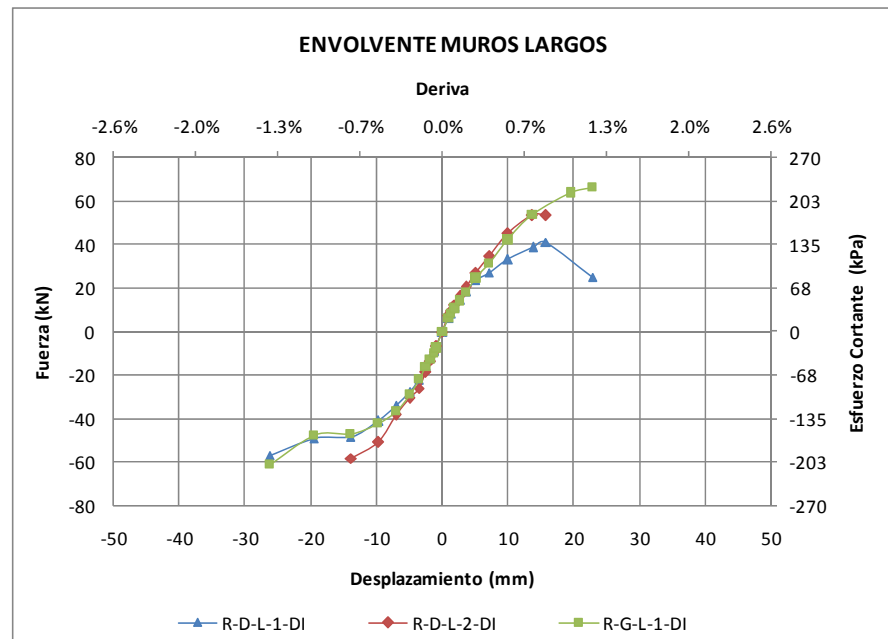


Figura 5-32 Envolvente de ciclos de histéresis muros largos
Fuente: El autor

Las envolventes de las curvas muestran que los muros, tanto cortos como largos, tienen un comportamiento lineal elástico hasta una deriva del 0.3% aproximadamente, excepto el espécimen R-G-L-1-DI que alcanza un valor de 0.5%; a partir de estos valores el comportamiento de los muros entra en el rango inelástico con ciclos de carga y descarga que van disminuyendo la rigidez de los elementos hasta un desplazamiento cercano al 2.0% de deriva en los muros cortos y 1.5% en los largos; finalmente, el aumento de fisuras importantes y la degradación de la rigidez disminuyen la capacidad de carga del elemento. Es importante anotar el comportamiento del espécimen R-D-C-2-DI, en donde se observa como esa relación entre carga y desplazamiento tenía una tendencia similar a la del espécimen R-G-C-1-DI hasta el punto donde el refuerzo adicional vertical colocado se desprende del muro y la capacidad de carga de este cae repentinamente, de ahí en adelante sigue trabajando únicamente el refuerzo en diagonal instalado inicialmente y el comportamiento de la curva es similar al final a la del espécimen R-D-C-1-DI. Similar desempeño se presenta en los muros largos donde nuevamente la curva del espécimen R-D-L-2-DI tiende a parecerse a la del R-G-C-1-DI pero llega al mismo punto donde se arranca el refuerzo adicional y pierde su capacidad de seguir ganando resistencia; esto evidencia nuevamente la importancia de que el material de refuerzo esté debidamente anclado para que se pueda lograr una mayor eficiencia del mismo y un mejor desempeño en el comportamiento del muro.

La relación de esbeltez es otro factor que puede ser analizado en el comportamiento de los muros; en los especímenes cortos se observa que tienen desplazamientos laterales mucho mayores que los largos, lo anterior se debe a que estos elementos al ser más esbeltos tienen una rigidez mucho menor que los muros largos (menos esbeltos) y por consiguiente van a tener desplazamientos más grandes.

Otro factor que afecta la respuesta histerética en este tipo de elementos es la presencia de carga axial; para el caso en estudio los muros de prueba no tenían esta sollicitación, por consiguiente la consecución de falla por corte, como inicialmente se había planteado en el diseño del reforzamiento, no fue posible y por el contrario predominó la falla por flexión a pesar de que en algunos de los muros largos se intentó formar la falla buscada; de igual manera, la ausencia de carga axial también ayuda a que el desplazamiento lateral llegue a valores cercanos al 2.0% de deriva, contrario a ensayos donde sí se tiene esta sollicitación y los desplazamiento son del orden del 1.0% de deriva.

5.4.4 Degradación de rigidez

La rigidez de los muros corresponde a la pendiente de cada uno de los lazos que componen los ciclos de histéresis presentados en la Figura 5-30; dicha pendiente se calculó como la relación entre la carga y el desplazamiento producido en cada uno de esos lazos. Para fines comparativos, en cada ciclo se trabajó con la rigidez inicial; en las Figuras 5-33 y 5-34 se presentan las curvas de degradación de rigidez lateral inicial de los muros largos y cortos, respectivamente.

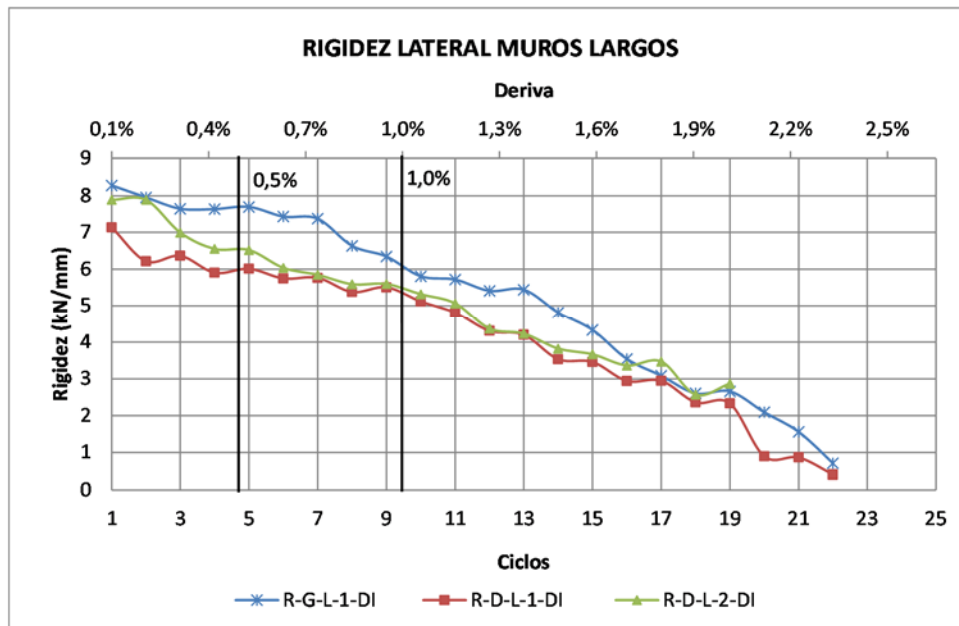


Figura 5-33 Degradación de rigidez muros largos
Fuente: El autor

El espécimen R-G-L-1-DI presenta la mayor rigidez de los tres muros largos con un valor de 8.28 kN/mm; este valor concuerda con los valores obtenidos de carga máxima donde se encontró que el espécimen de configuración en grilla tenía una mayor capacidad de carga que los especímenes con refuerzo en diagonal; estos últimos presentan valores de rigidez de 7.14 kN/mm y 7.89 kN/mm para los muros R-D-L-1-DI y R-D-L-2-DI, respectivamente. Es importante observar como el refuerzo adicional vertical colocado al segundo espécimen con configuración en diagonal hace que la rigidez de este elemento durante los primeros ciclos sea similar a la del espécimen con refuerzo en grilla, pero al producirse el desprendimiento del refuerzo adicional la curva de rigidez se vuelve similar a la del primer espécimen con la misma configuración, tal y como se comprobó en las

envolventes de las curvas de histéresis. En cuanto a la degradación de la rigidez a medida que avanzan los ciclos de carga y descarga, en la Tabla 5-4 se muestra la disminución de la rigidez en una deriva del 0.5% y del 1.0%, valores que limita el NSR – 10 en el diseño de muros de mampostería, este último cuando el modo prevaeciente de falla en los muros es la flexión (como ha sido el resultado en los especímenes de esta investigación).

Tabla 5-4 Valores de degradación de rigidez en los muros largos

ESPÉCIMEN	VAROLES DE RIGIDEZ (kN/mm)			% RIGIDEZ RESPECTO AL TOTAL		% DISMINUCIÓN DE RIGIDEZ	
	INICIAL	AL 0.5% DERIVA	AL 1.0% DERIVA	AL 0.5% DERIVA	AL 1.0% DERIVA	AL 0.5% DERIVA	AL 1.0% DERIVA
R-G-L-1-DI	8,28	7,65	6,10	92%	74%	8%	26%
R-D-L-1-DI	7,14	6,00	5,50	84%	77%	16%	23%
R-D-L-2-DI	7,89	6,52	5,45	83%	69%	17%	31%

Según la Tabla 5-4 la disminución de la rigidez al 0.5% de deriva es baja, en el muro con configuración de refuerzo en grilla sólo es del 8% y en los muros en diagonal de un 16.5%; incluso a un valor de deriva del 1.0% la rigidez de los tres especímenes en promedio está por encima del 70% lo cual indica que el material de refuerzo tienen un buen desempeño a la hora de garantizar esta propiedad que está directamente relacionada con la integridad del muro a la hora de resistir este tipo de solicitaciones.

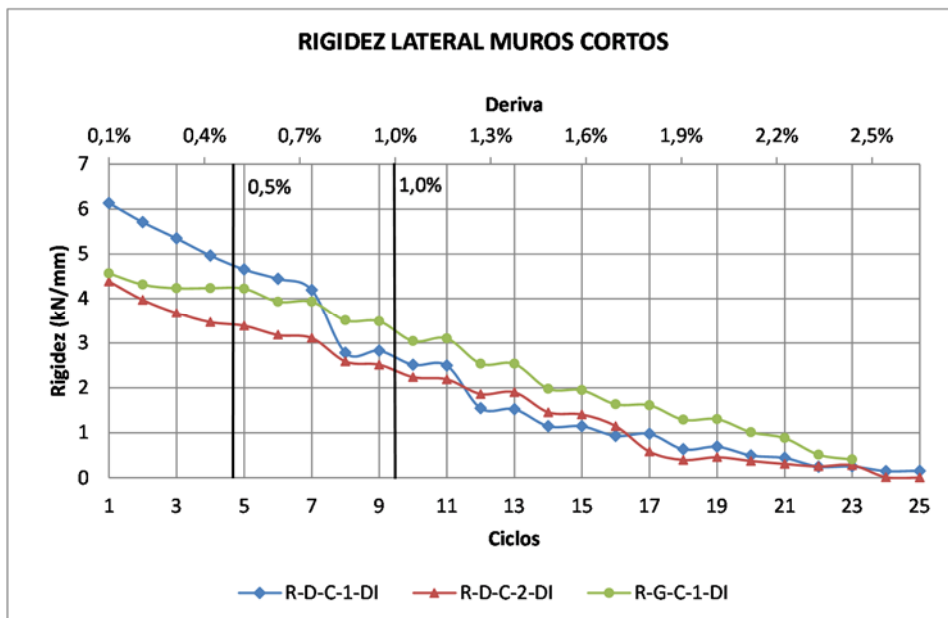


Figura 5-34 Degradación de rigidez muros cortos

Fuente: El autor

En los muros cortos, contrario a lo visto en los muros largos, el espécimen R–D–C–1–DI presenta la mayor rigidez de los tres muros con un valor de 6.13 kN/mm; contra 4.57

kN/mm y 4.39 kN/mm para los muros R-G-C-1-DI y R-D-C-2-DI, respectivamente. En esta oportunidad, el valor de rigidez para el muro en diagonal se considera atípico puesto que fue el muro en grilla quien tuvo una capacidad de carga mayor y por consiguiente debería tener una mayor rigidez tal y como ocurrió en los muros largos. Sin embargo es importante observar que sólo hasta el ciclo 7 se presentó este comportamiento atípico ya que en ese punto el espécimen R-D-C-1-DI tuvo un fuerte descenso en su rigidez y su tendencia siguiente fue la del segundo muro con refuerzo en diagonal como era de esperarse. En cuanto a la degradación de la rigidez a medida que avanzan los ciclos de carga y descarga para los muros cortos, en la Tabla 5-5 se muestra la disminución de la rigidez para los mismos valores de deriva estudiados en los muros largos.

Tabla 5-5 Valores de degradación de rigidez en los muros cortos

ESPÉCIMEN	VAROLES DE RIGIDEZ (kN/mm)			% RIGIDEZ RESPECTO AL TOTAL		% DISMINUCIÓN DE RIGIDEZ	
	INICIAL	AL 0.5% DERIVA	AL 1.0% DERIVA	AL 0.5% DERIVA	AL 1.0% DERIVA	AL 0.5% DERIVA	AL 1.0% DERIVA
R-G-C-1-DI	4,57	4,24	3,25	93%	71%	7%	29%
R-D-C-1-DI	6,13	4,70	2,65	77%	43%	23%	57%
R-D-C-2-DI	4,39	3,40	2,38	77%	54%	23%	46%

Según la Tabla 5-5 la disminución de la rigidez al 0.5% de deriva es baja para el muro con configuración de refuerzo en grilla, sólo del 7%, contrario a los muros en diagonal donde ya es un poco mayor alcanzando un 23%; para el 1.0% de deriva el muro en grilla presenta una disminución del 29% es decir que mantiene la tendencia de los muros largos con una rigidez superior al 70%; sin embargo, los muros con refuerzo en diagonal si presentan un alto descenso en el valor de la rigidez llegando a estar incluso por debajo del 50% de la rigidez total demostrando que esta configuración de reforzamiento no es muy recomendada en muros con demasiada esbeltez.

5.4.5 Ductilidad

Para calcular la ductilidad y la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico de los muros se utilizó la metodología planteada por (Paulay T. & Priestley M.J., 1992) utilizando los principios de igualación de desplazamientos e igualación de energías. En la Figura 5-35 se presenta un esquema de ambos principios.

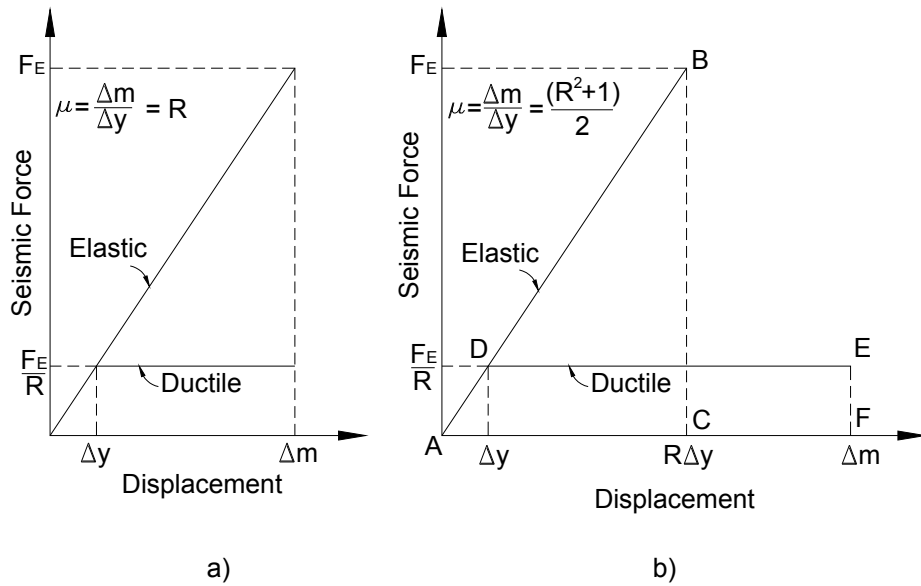


Figura 5-35 Relación entre ductilidad y factor de reducción de fuerza
a) Desplazamientos iguales; b) Energías iguales
Fuente: Tomado de Paulay T. & Priestley M.J., 1992. p. 77.

Según lo planteado por los autores (Paulay T. & Priestley M.J., 1992, pp. 76-78) para estructuras con un periodo natural grande el desplazamiento máximo logrado por un sistema inelástico es muy similar al obtenido en un sistema elástico con la misma rigidez pero con una resistencia ilimitada como se observa en la Figura 5-35 a); Esa geometría implica que la ductilidad μ lograda por un sistema inelástico es aproximadamente igual al factor de reducción de fuerza R ($\mu = R$); este procedimiento es llamado algunas veces el principio de desplazamientos iguales. Sin embargo, cuando la estructura tiene periodos naturales de vibración más bajos, esta aseveración no es muy conservadora y en ese caso resulta más razonable estimar ese factor R igualando las energías elásticas e inelásticas, a lo que se conoce como el principio de igualación de energías; en la Figura 5-35 b) al igualar las áreas del triángulo ABC y el trapecio ADEF se obtiene que $\mu = (R^2 + 1)/2$. Finalmente, los autores proponen las siguientes expresiones para el cálculo del factor de reducción de fuerza dependiendo del periodo de la estructura:

$$\begin{aligned} \text{Períodos largos} &\rightarrow R = \mu \\ \text{Períodos cortos} &\rightarrow R = \sqrt{2\mu - 1} \\ T = 0 &\rightarrow R = 1 \end{aligned}$$

Donde μ corresponde a la ductilidad que por definición representa la relación entre la deformación máxima Δ_m y la deformación de fluencia Δ_y ($\mu = \Delta_m/\Delta_y$).

Para fines del cálculo del factor de capacidad de disipación de energía básico R_0 , los valores de Δ_m y Δ_y fueron obtenidos de las envolventes de las curva de histéresis mostradas en la Figura 5-31 y 5-32, que se muestran a continuación de manera individual para cada uno de los especímenes en la Figura 5-36.

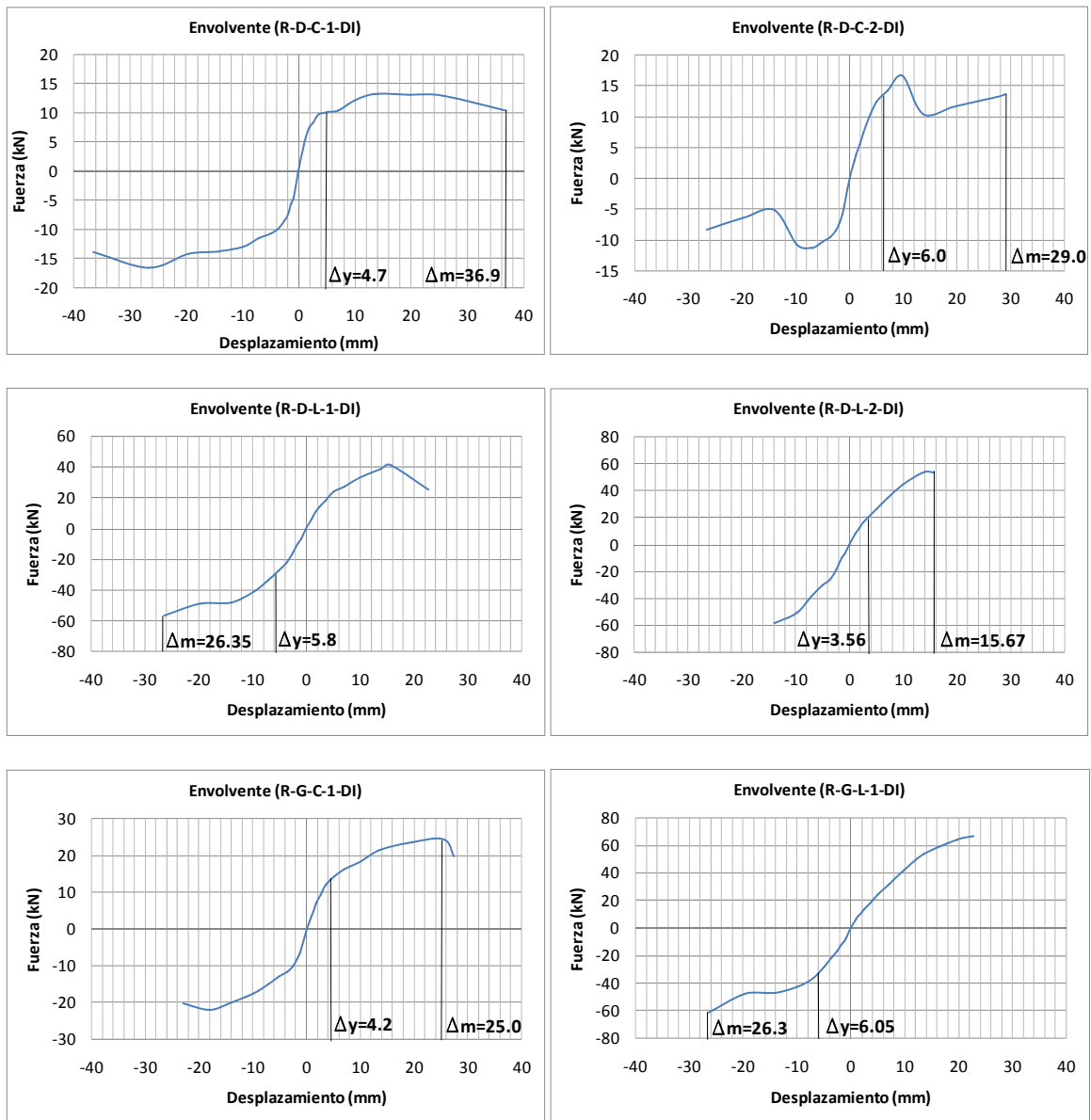


Figura 5-36 Determinación de Δ_m y Δ_y

Fuente: El autor

La Tabla 5-6 presenta un resumen de los valores de Δ_m y Δ_y junto con el respectivo cálculo de R que en este caso sería el valor de R_0 para los muros cortos y largos.

Tabla 5-6 Cálculo de R_0

Muros Cortos

ESPECIMEN	Δ_y (mm)	Δ_m (mm)	μ	R_0
R-D-C-1-DI	4.70	36.93	7.9	3.8
R-D-C-2-DI	6.00	28.99	4.8	2.9
R-G-C-1-DI	4.20	25.00	6.0	3.3

Promedio 3.4
 Dispersión 13.4%

Muros Largos

ESPECIMEN	Δ_y (mm)	Δ_m (mm)	μ	R_0
R-D-L-1-DI	5.80	26.35	4.5	2.8
R-D-L-2-DI	3.56	15.67	4.4	2.8
R-G-L-1-DI	6.05	26.29	4.3	2.8

Promedio 2.8
 Dispersión 1.3%

Los resultados de la Tabla 5-6 muestran que, sin tener en cuenta el valor del espécimen R-D-C-1-DI, el cual está un poco disperso de los valores de los demás especímenes, el factor de capacidad de disipación de energía básico, R_0 está en promedio por el orden de **2.9**. Es importante resaltar que para garantizar este valor se requiere de un mayor número de ensayos, además hay que tener en cuenta que es un poco alto si se compara con lo establecido por el NSR – 10 en este tipo de edificaciones, donde especifica un valor de 1.0 para muros no reforzados, o el ASCE 7 que especifica 1.5; esto se debe a que el material presente en los sistemas de anclaje (concreto y acero) mejoran la capacidad de disipación de energía, por lo tanto el valor de 2.9 no se le puede atribuir únicamente al FRP. Por esta razón, para fines investigativos se recomienda un valor razonable de R_0 entre 1.5 y 2.0 como máximo.

5.4.6 Deformaciones unitarias en la fibra

Como se mencionó en el numeral 4.5.8 de este documento a cada espécimen de los ensayos dinámicos y algunos de los estáticos se les colocó una galga extensiométrica en el material de refuerzo (strain gages) para poder medir las deformaciones en la fibra y

conocer el nivel de esfuerzo al cual estaba trabajando la misma; conocido el modo principal de falla de los especímenes, el dispositivo fue colocado en la parte inferior del refuerzo de cada uno, buscando obtener las mayores lecturas de deformación. A pesar de haber tomado varias lecturas de los ensayos, la mayoría de los valores reportados por el equipo correspondían a valores atípicos que no indicaban correctamente el verdadero comportamiento del material; por esta razón a continuación sólo se presenta el resultado de dos especímenes (uno estático y uno dinámico) que fueron los únicos que mostraron valores acordes a lo esperado; la Figura 5-37 muestra las curvas de deformación unitaria en la fibra versus la deriva reportada en los dos especímenes; las gráficas muestran un comportamiento elástico del material en el espécimen R-D-L-1-DI, mientras que en el R-G-C-2-ES este comportamiento se mantiene hasta una deriva aproximada del 0.4%.

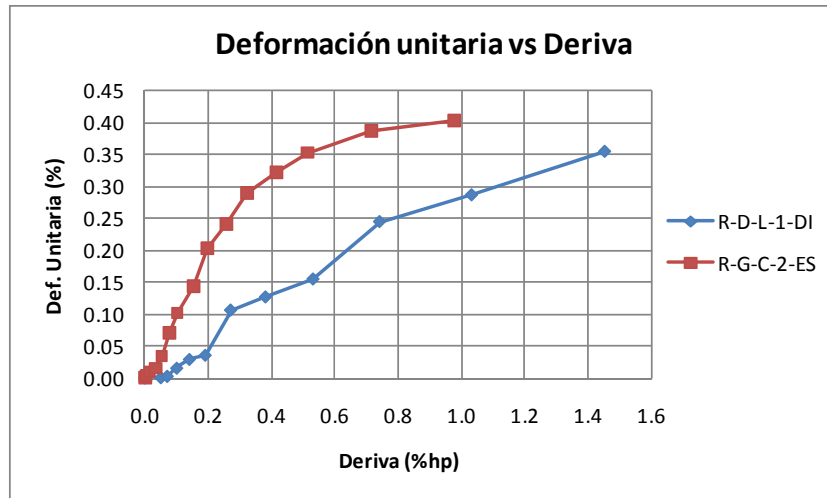


Figura 5-37 Deformación unitaria en la fibra vs Deriva
Fuente: El autor

A continuación se presentan algunos valores reportados por el fabricante de la fibra que permiten hacer algunas comparaciones:

Resistencia a la tensión de la fibra curada	f_{fu}^*	651 MPa
Módulo de elasticidad de la fibra curada	E_f	62354 MPa
Elongación de rotura de la fibra curada	ϵ_{fu}^*	0.0091

Los máximos valores de deformación obtenidos en los ensayos (0.40% y 0.36%) están bastante alejados del valor de rotura reportado por el fabricante; es importante recordar que el espécimen R-G-C-2-ES no llegó a la rotura así que no es posible comprobar si la deformación en ese punto alcanzó el valor reportado el fabricante, a pesar de que el

espécimen R-D-L-1-DI si alcanzó la rotura en la fibra, tampoco fue posible tomar ese valor de deformación debido a que a ese nivel de esfuerzo y daño en el elemento la lectura de deformaciones fue suspendida debido al riesgo que podía correr a su integridad física la persona encargada de tomar esos valores. Por otro lado, teniendo en cuenta el comportamiento elástico de este material se pudo estimar el estado de esfuerzo en la fibra para el valor máximo de deformación tomado en el ensayo, dichos valores corresponden a 251 MPa y 221 MPa para el espécimen en grilla y en diagonal respectivamente; estos resultados, que se obtienen de multiplicar el módulo de elasticidad de la fibra curada por la deformación unitaria medida, nuevamente se encuentran muy alejados de los 651 MPa reportados por el fabricante. Sin embargo, para fines de diseño estos valores de esfuerzo obtenidos están por encima de los calculados en el Anexo H lo cual indica que se está trabajando por el lado de la seguridad.

5.4.7 Comparación de resultados experimentales con los obtenidos por diseño según el Documento ACI 440.7R – 10.

A continuación se presenta una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente en los ensayos y los calculados por diseño siguiendo la metodología propuesta en el Documento ACI 440.7R – 10, que corresponde a la Guía de diseño de este tipo de reforzamiento aprobada en Estados Unidos. La Tabla 5-7 muestra los valores de carga lateral máxima resistida por los especímenes de prueba en los ensayos y las calculadas teóricamente tanto por corte como por flexión, esta última en el acero de anclaje y en el FRP, sin reducir los valores por ϕ ; también se presenta el cálculo del factor de seguridad que corresponde a la relación entre los valores obtenidos experimentalmente y los mínimos teóricos de las tres cargas calculadas.

Tabla 5-7 Comparación de resultados experimentales y teóricos

ESPÉCIMEN N°	CONFIGURACIÓN REFORZAMIENTO	TIPO DE ESPÉCIMEN	CÓDIGO DE IDENT.	CARGA MÁX _{EXP.} (kN)	CARGA MÁX _{TEOR.} (kN)			CARGA MÁX _{TEOR.} FINAL (kN)	FACTOR DE SEG.
					Corte	Tensión Acero Anclaje	Tensión FRP		
1	Grilla	Corto	R-G-C-2-ES	23,4	24,6	26,9	16,7	16,7	1,40
2	Diagonal	Largo	R-D-L-4-ES	40,9	60,0	62,7	33,0	33,0	1,24
3	Diagonal	Corto	R-D-C-1-DI	16,5	28,5	26,9	13,8	13,8	1,20
4	Diagonal	Corto	R-D-C-2-DI	16,6	28,5	26,9	13,8	13,8	1,20
5	Diagonal	Largo	R-D-L-1-DI	56,7	60,0	62,7	33,0	33,0	1,72
6	Diagonal	Largo	R-D-L-2-DI	58,1	60,0	62,7	33,0	33,0	1,76
7	Grilla	Corto	R-G-C-1-DI	24,4	24,6	26,9	16,7	16,7	1,46
8	Grilla	Largo	R-G-L-1-DI	66,6	43,9	62,7	56,0	43,9	1,52

El valor de la carga lateral máxima teórica por flexión debida al acero de los anclajes del muro, se obtuvo al igualar el momento actuante en los anclajes y el momento resistente en los mismos. La Figura 5-38 presenta un esquema de esta condición. La fuerza de tensión se obtiene de la menor entre la resistencia a la fluencia de las barras y la resistencia a la adherencia entre las barras y el adhesivo epóxico utilizado para el anclaje; el primer valor corresponde a un esfuerzo de fluencia de 420 MPa (Acero grado 60) que para dos barras de 1/2” de diámetro da una carga de tensión de 106.7 kN; para el segundo valor se utilizan los resultados de los ensayos de extracción de barras de acero sobre macizos de concreto realizados por (Ramírez, 2014, p. 84) en su investigación y en la cual utilizó el mismo adhesivo epóxico que se usó en esta investigación, el valor de esfuerzo de adherencia reportado fue de 52 kg/cm² (5.1 MPa); el cálculo de la carga de tensión será este valor de esfuerzo por el área perimetral expuesta de cada barra; recordando que la profundidad de anclaje fue de 15 cm, la fuerza de tensión será $T = 5.1 * 12.7 * \pi * 150 * 2 = 61.0 \text{ kN}$, así que finalmente el valor de T será este último calculado.

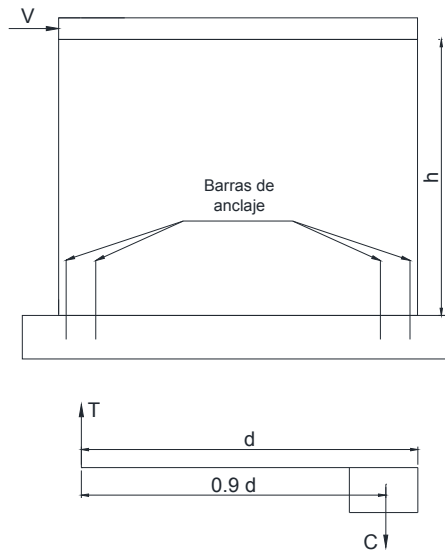


Figura 5-38 Cálculo de la carga lateral máxima por flexión debida al acero en los anclajes
Fuente: El autor

$$M_{actuante} = M_{resistente} \rightarrow V * h = T * 0.9d$$

$$V = \frac{T * 0.9d}{h} = \frac{61.0 \text{ kN} * 0.9 * 2.17 \text{ m}}{1.90 \text{ m}} = 62.7 \text{ kN para los muros largos}$$

$$V = \frac{T * 0.9d}{h} = \frac{61.0 \text{ kN} * 0.9 * 0.93 \text{ m}}{1.90 \text{ m}} = 26.9 \text{ kN para los muros cortos}$$

Al observar los factores de seguridad obtenidos se encuentra que los especímenes cortos con una configuración de refuerzo en diagonal presentan los valores más bajos lo que

indica que esta configuración no es muy recomendada en elementos esbeltos ya que se disminuye la carga esperada de falla debido a la falta de refuerzo en las zonas de mayor sollicitación; los demás especímenes tienen en promedio un factor de seguridad de 1.52 indicando que los procedimientos establecidos en la guía de diseño están por el lado de la seguridad estructural. Es importante mencionar que este adecuado comportamiento fue posible gracias a que se logró vincular el muro a su cimentación, es decir que el sistema de anclaje usado fue óptimo.

5.4.8 Ejemplo de diseño

Con el fin de presentar una aplicación práctica, a continuación se presenta un análisis sísmico de las fuerzas a las cuales estarían sometidos los muros de una vivienda típica de dos pisos construida con muros de mampostería no estructural de características mecánicas similares a los utilizados en este proyecto. La Figura 5-39 presenta una planta arquitectónica típica de la distribución de los muros en una edificación de estas características.

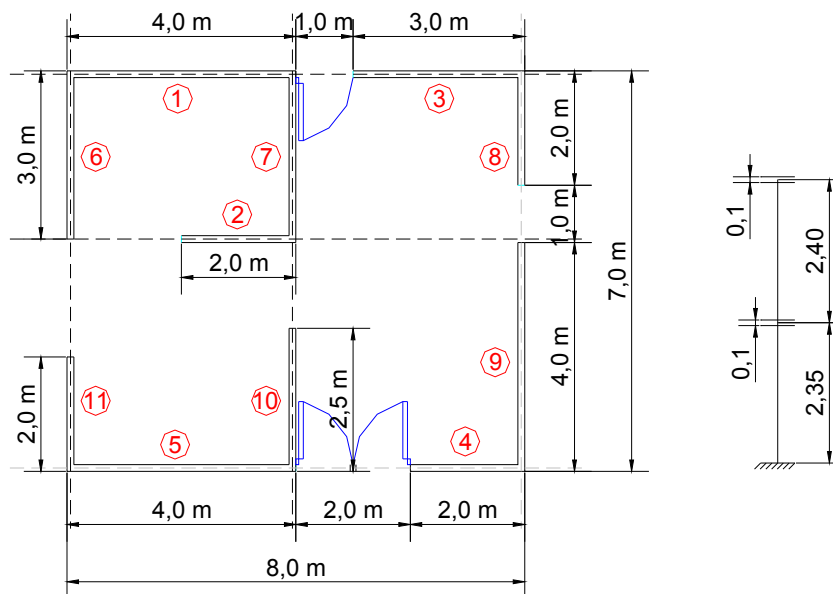


Figura 5-39 Planta arquitectónica de la distribución de muros en una vivienda típica
Fuente: El autor

Los datos del material de la edificación y la ubicación de la misma se presentan a continuación:

- Muros de Mampostería
- Espesor t muros (m)= 0,12
- f_m (MPa)= 5.3
- γ_{Mamp} (kN/m³)= 18.5
- Espesor losa (m)= 0,10
- γ_{Conc} (kN/m³)= 24
- Ubicación: Cali
- Perfil de Suelo Tipo C
- Grado de Importancia 1.0
- A_a = 0,25
- F_a = 1,15

Avalúo de Cargas

		<i>Piso 1</i>	<i>Piso 2</i>
		kN/m ²	kN/m ²
Placa:	0,10x24	2.4	2.4
Acabados:	0,05x22	1.1	1.1
Muros Estructurales:	0,12x31,5x2,3x18.5/56	<u>2.87</u>	<u>1.44</u>
		6.37	4.94
$W_{piso 1}$ =	6.37x56 =	356.8 kN	
$W_{piso 2}$ =	4.94x56 =	276.4 kN	
W_{Total} =	356.8+276.4 =	633.3 kN	

Como el período natural de vibración en estas estructuras es bajo (edificaciones de 1 o 2 pisos), la mayoría de estas se encuentran en la zona de la meseta del espectro elástico de diseño, así que:

$S_a = 2,5 \cdot A_a \cdot F_a \cdot I$ 0.72
 $V_b =$ 455.2 kN
 $k =$ 1

Tabla 5-8 Fuerza horizontal equivalente para el ejercicio de aplicación

FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE							
Piso	$h_{entre\ piso}$ (m)	h_{total} (m)	W (kN)	Wh^k	C_{vx}	F_p (kN)	V_p (kN)
2	2.40	4.75	276.4	1313.0	0.61	277.8	277.8
1	2.35	2.35	356.8	<u>838.6</u>	0.39	<u>177.4</u>	455.2
				$\Sigma =$ 2151.56	$\Sigma =$ 455.2		

Análisis para el piso 1

Cálculo de la Rigidez de los Muros.

H =	2.35 m	h (m)	H/h	K (kN/m)
f'm =	5.3 MPa	2.0	1.1750	47633.6
E = 750f'm	3975 Mpa	2.5	0.9400	77657.8
t =	0.12 m	3.0	0.7833	111640.4
Et =	477000 kN/m	4.0	0.5875	185342.2

Donde: K = Rigidez del muro
 H = la altura del muro
 h = Longitud del muro
 E= Módulo de elasticidad de la mampostería
 t = Espesor del muro

$$K = \frac{Et}{4\left(\frac{H}{h}\right)^3 + 3\left(\frac{H}{h}\right)}$$

Centro de Masas

Centro de Rigidez

X _{CM} =	4.00 m	X _{CR} =	4.51 m
Y _{CM} =	3.50 m	Y _{CR} =	3.93 m

$$X_{CR} = \frac{\sum K_{yi} * x_i}{\sum K_{yi}} \quad Y_{CR} = \frac{\sum K_{xi} * y_i}{\sum K_{xi}}$$

ΣKx = 577592.1 kN/m
 ΣKy = 581548.0 kN/m

SISMO EN X

SISMO EN Y

e _y = Y _{CR} - Y _{CM} =	0.43 m	e _x = X _{CR} - X _{CM} =	0.51 m
M _T = V _{P1} * e _y =	195.30 kN.m	M _T = V _{P1} * e _x	230.7 kN.m

$$V_i' = \frac{K_i(X_i \delta Y_i)}{\sum (K_i X_i^2 + K_i Y_i^2)} M_T$$

MURO	K (kN/m)	X ó Y (m)	K.(X ó Y) (kN)	K.(X ² ó Y ²)	V _i 'x (kN)	V _i 'y (kN)
1	185342	3.07	569169	1747865	8.9	10.5
2	47634	0.07	3378	239	0.1	0.1
3	111640	3.07	342837	1052821	5.3	6.3
4	47634	3.93	187157	735357	2.9	3.4
5	185342	3.93	728227	2861271	11.4	13.4
6	111640	4.51	503156	2267692	7.8	9.3
7	111640	0.51	56595	28690	0.9	1.0
8	47634	3.49	166387	581201	2.6	3.1
9	185342	3.49	647412	2261453	10.1	11.9
10	77658	0.51	39368	19957	0.6	0.7
11	47634	4.51	214682	967556	3.3	4.0

Fuerzas en los Muros Sentido X

Fuerzas en los Muros Sentido Y

Muro	$(K_{ix}/\sum K_x) \cdot V_p$	V_i' (kN)	V_{Total} (kN)	$(K_{iy}/\sum K_y) \cdot V_b$	V_i' (kN)	V_{Total} (kN)
1	146.1	8.88	137.2	-	10.5	10.5
2	37.5	0.05	37.5	-	0.1	0.1
3	88.0	5.35	82.6	-	6.3	6.3
4	37.5	2.92	40.5	-	3.4	3.4
5	146.1	11.36	157.4	-	13.4	13.4
6	-	7.85	7.8	87.4	9.3	96.6
7	-	0.88	0.9	87.4	1.0	88.4
8	-	2.59	2.6	37.3	3.1	34.2
9	-	10.10	10.1	145.1	11.9	133.1
10	-	0.61	0.6	60.8	0.7	61.5
11	-	3.35	3.3	37.3	4.0	41.2

En la Figura 5-40 se presentan las fuerzas calculadas anteriormente para cada uno de los muros que conforman el piso 1 de la edificación teniendo en cuenta el sismo en ambos sentidos.

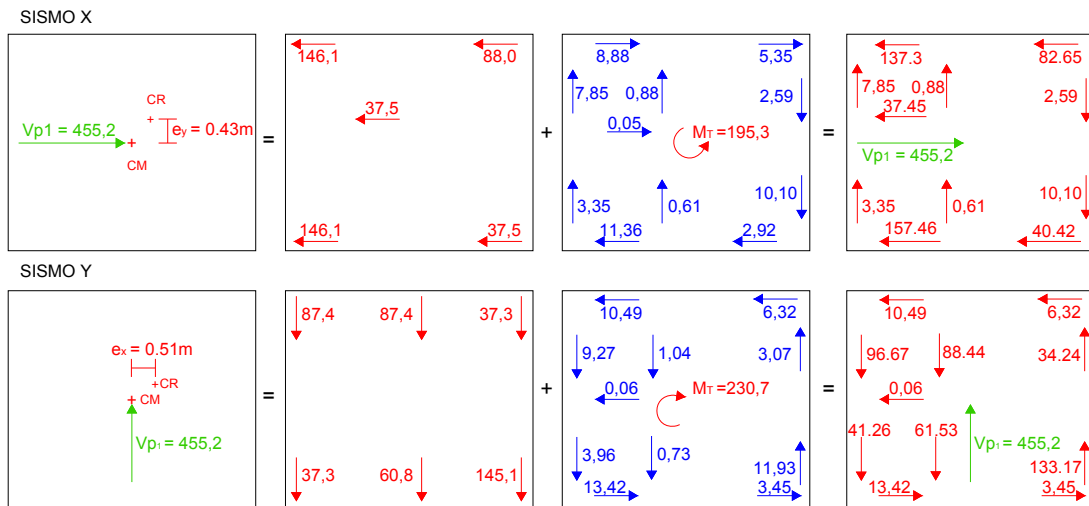


Figura 5-40 Fuerzas Cortantes en los muros del piso 1 para sismo en X y Y

Fuente: El autor

Análisis para el piso 2

Cálculo de la Rigidez de los Muros.

H =	4.75 m	h (m)	H/h	K (kN/m)
f'm =	5.3 MPa	2.0	2.3750	7856.9
E = 750f'm	3975 Mpa	2.5	1.9000	14395.2
t =	0.12 m	3.0	1.5833	23124.7
Et =	477000 kN/m	4.0	1.1875	46487.9

Centro de Masas

Centro de Rigidez

$X_{CM} = 4.00 \text{ m}$ $X_{CR} = 4.76 \text{ m}$
 $Y_{CM} = 3.50 \text{ m}$ $Y_{CR} = 3.94 \text{ m}$

SISMO EN X

SISMO EN Y

$e_y = Y_{CR} - Y_{CM} = 0.44 \text{ m}$ $e_x = X_{CR} - X_{CM} = 0.76 \text{ m}$
 $M_T = V_{P1} * e_y = 120.88 \text{ kN.m}$ $M_T = V_{P1} * e_x = 211.3 \text{ kN.m}$

MURO	K (kN/m)	X ó Y (m)	K.(X ó Y) (kN)	K.(X ² ó Y ²)	V _i 'x (kN)	V _i 'y (kN)
1	46488	3.06	142476	436660	6.2	10.8
2	7857	0.06	509	33	0.0	0.0
3	23125	3.06	70872	217210	3.1	5.4
4	7857	3.94	30918	121670	1.3	2.3
5	46488	3.94	182939	719902	7.9	13.9
6	23125	4.76	110090	524110	4.8	8.3
7	23125	0.76	17592	13382	0.8	1.3
8	7857	3.24	25451	82442	1.1	1.9
9	46488	3.24	150587	487791	6.5	11.4
10	14395	0.76	10951	8331	0.5	0.8
11	7857	4.76	37405	178073	1.6	2.8

2789605

Fuerzas en los Muros Sentido X

Fuerzas en los Muros Sentido Y

Muro	$(K_{ix}/\sum K_x) * V_P$	V _i ' (kN)	V _{Total} (kN)	$(K_{iy}/\sum K_y) * V_b$	V _i ' (kN)	V _{Total} (kN)
1	98.0	6.17	91.8	-	10.8	10.8
2	16.6	0.02	16.5	-	0.0	0.0
3	48.7	3.07	45.7	-	5.4	5.4
4	16.6	1.34	17.9	-	2.3	2.3
5	98.0	7.93	105.9	-	13.9	13.9
6	-	4.77	4.8	52.3	8.3	60.6
7	-	0.76	0.8	52.3	1.3	53.6
8	-	1.10	1.1	17.8	1.9	15.8
9	-	6.53	6.5	105.1	11.4	93.7
10	-	0.47	0.5	32.5	0.8	33.4
11	-	1.62	1.6	17.8	2.8	20.6

En la Figura 5-41 se presentan las fuerzas calculadas anteriormente para cada uno de los muros que conforman el piso 2 de la edificación teniendo en cuenta el sismo en ambos sentidos.

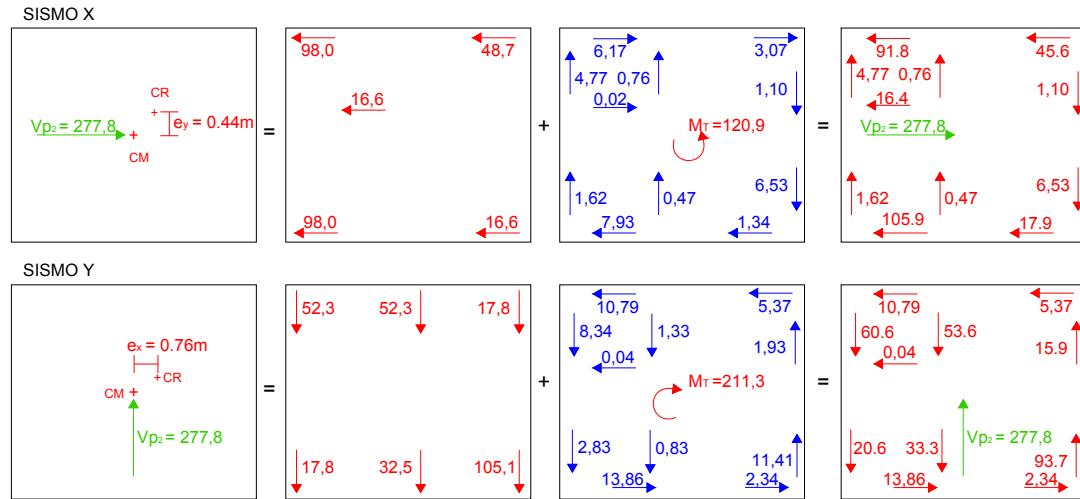
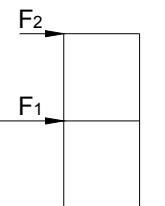


Figura 5-41 Fuerzas Cortantes en los muros del piso 2 para sismo en X y Y
Fuente: El autor

Con el fin de realizar comparaciones se seleccionaron cuatro muros de la estructura (dos en cada sentido) *teniendo como criterio la longitud de los mismos buscando que esta fuera similar a la de los especímenes de prueba utilizados en esta investigación*; los muros seleccionados fueron el 2 y el 4 (sentido x) y el 8 y el 10 (sentido y). La Tabla 5-9 presenta el resumen de la fuerza cortante (V) y fuerza lateral de cada piso (F_i) para cada uno de los muros seleccionados.

Tabla 5-9 Fuerzas finales en los muros seleccionados

MURO 2				
Piso	V (kN)	F_i (kN)	$h_{\text{entre piso}}$ (m)	h_{total} (m)
2	16.5	16.5	2.40	4.75
1	37.5	20.9	2.35	2.35
MURO 4				
Piso	V (kN)	F_i (kN)	$h_{\text{entre piso}}$ (m)	h_{total} (m)
2	17.9	17.9	2.40	4.75
1	40.5	22.6	2.35	2.35
MURO 8				
Piso	V (kN)	F_i (kN)	$h_{\text{entre piso}}$ (m)	h_{total} (m)
2	15.8	15.8	2.40	4.75
1	34.2	18.4	2.35	2.35
MURO 10				
Piso	V (kN)	F_i (kN)	$h_{\text{entre piso}}$ (m)	h_{total} (m)
2	33.4	33.4	2.40	4.75
1	61.5	28.1	2.35	2.35



Si se observan los valores de F_i en cada muro, que corresponden a la fuerza lateral aplicada en cada piso (sería el equivalente a la fuerza lateral que se aplicó a los especímenes de prueba de esta investigación), y se comparan con los valores de la Tabla 5-2, se puede comprobar que cualquiera de los especímenes largos, sin importar la configuración de reforzamiento, estarían en capacidad de soportar esas solicitaciones, incluso el espécimen R-G-C-1-DI que tiene una longitud de 1.23 m podría resistir las fuerzas de los muros 2, 4 y 8 que tienen una longitud de 2.0 m; vale la pena aclarar que los valores presentados en la Tabla 5-9 no están divididos por el factor de reducción R, que se estimó en el numeral 5.4.5 de este documento. Esto demuestra que este material de refuerzo puede ser una alternativa muy importante a los sistemas de reforzamiento convencionales ya que está en capacidad de soportar este tipo de solicitaciones.

La Tabla 5-10 presenta los valores de ϕV_n obtenidos del diseño del muro 10 de 2.50 m de longitud utilizando una configuración de reforzamiento en grilla con dos franjas verticales CFRP de 15 cm de ancho ubicadas en los extremos y 5 franjas de 10 cm de ancho ubicadas horizontalmente cada 0.40 m (Similar a la del espécimen R-G-L-1-DI). Los valores de ϕ utilizados corresponden a 0.8 para corte y 0.6 para flexión; el valor de R para este ejemplo fue de 1.5; para verificar los valores presentados el lector puede remitirse al Anexo H de este documento y seguir el procedimiento ahí establecido; los resultados muestran que el diseño es un poco conservador y la cantidad de refuerzo colocado podría reducirse un poco; sin embargo para fines de comparación con uno de los especímenes usados en el proyecto se deja de esta manera.

Tabla 5-10 Valores de diseño para el Muro 10

PISO	$V_u = F_i/R$ (kN)	ϕV_n (kN)			$\phi V_{n_{Final}}$ (kN)	Cumple
		Corte	Tensión Acero Anclaje	Tensión FRP		
2	22,3	40,6	52,5	58,1	40,6	Si, $\phi V_n > V_u$
1	18,7	40,6	52,5	58,1	40,6	Si, $\phi V_n > V_u$

5.4.9 Análisis de costos

Un factor importante a la hora de desarrollar un proyecto de reforzamiento en una edificación es la parte económica; por esta razón, a continuación se presentan las cantidades de material, con su respectivo costo, que se utilizaron en el desarrollo de este proyecto de investigación; de esta manera, es posible estimar el costo de realizar un reforzamiento con materiales compuestos (CFRP) de un muro de mampostería de características similares a las utilizadas en este proyecto; los precios de los tejidos de fibra de carbono y resinas epóxicas que se presentan a continuación fueron reportados por el fabricante Sika Colombia S.A. para el año 2015. La Tabla 5-11 presenta una descripción de los precios unitarios para la construcción y reforzamiento de uno de los muros estudiados en el proyecto; al final de la misma se presenta el costo por metro cuadrado del muro reforzado.

Tabla 5-11 Precios unitarios de un muro del proyecto reforzado con CFRP

Muro Largo (1.90 m x 2.47 m) Reforzado en Grilla (Estructura Nueva)				
Material/Actividad	Unidad	Cantidad	Vr. Unitario (\$)	Vr. Total (\$)
Bloque No. 5	UN	72	\$ 720	\$ 51,840
Mortero de pega Tipo M	m ³	0.08	\$ 391,366	\$ 31,309
Viga Superior concreto (15x15 cm)	m ³	0.056	\$ 384,340	\$ 21,360
Acero de refuerzo viga superior	kg	17.3	\$ 2,000	\$ 34,600
Tejido de fibra de carbono	m ²	2.08	\$ 266,800	\$ 554,944
Resina epóxica	kg	2.50	\$ 74,820	\$ 186,751
Arena de río	m ³	0.007	\$ 95,700	\$ 670
Disposición de escombros de demoliciones	m ³	0.02	\$ 4,230	\$ 85
Acero de refuerzo anclaje	kg	4.92	\$ 2,000	\$ 9,840
Epóxico para los anclajes	ml	75	\$ 160	\$ 12,000
Macizo Concreto anclajes	m ³	0.048	\$ 384,340	\$ 18,448
Mano de obra muro y anclajes	Hr	10	\$ 10,846	\$ 108,460
Mano de obra reforzamiento	m ²	2.08	\$ 30,000	\$ 62,400
TOTAL				\$ 1,092,707
Área del Muro			4.69 m ²	
TOTAL POR m² DE MURO			\$ 232,838 /m²	

La Tabla 5-12 presenta la misma descripción de los precios unitarios mostrada en la Tabla 5-11 solo que esta corresponde únicamente al reforzamiento del muro, es decir aquí se supone que el muro ya existe (como es la condición en la que se encuentran muchas estructuras donde este material puede ser usado como refuerzo); al final de la misma también se presenta el costo por metro cuadrado del muro reforzado.

Tabla 5-12 Precios unitarios de un muro existente reforzado con CFRP

Muro Largo (1.90 m x 2.47 m) Reforzado en Grilla (Estructura Existente)				
Material/Actividad	Unidad	Cantidad	Vr. Unitario (\$)	Vr. Total (\$)
Tejido de fibra de carbono	m ²	2.08	\$ 266,800	\$ 554,944
Resina epóxica	kg	2.50	\$ 74,820	\$ 186,751
Arena de río	m ³	0.007	\$ 95,700	\$ 670
Disposición de escombros de demoliciones	m ³	0.02	\$ 4,230	\$ 85
Acero de refuerzo anclaje	kg	4.92	\$ 2,000	\$ 9,840
Epóxico para los anclajes	ml	75	\$ 160	\$ 12,000
Macizo Concreto anclajes	m ³	0.048	\$ 384,340	\$ 18,448
Mano de obra anclajes	Hr	6	\$ 10,846	\$ 65,076
Mano de obra reforzamiento	m ²	2.08	\$ 30,000	\$ 62,400
TOTAL				\$ 910,214
Área del Muro			4.69 m ²	
TOTAL POR m² DE MURO			\$ 193,951 /m²	

El procedimiento para calcular los costos de los demás especímenes es el mismo, únicamente cambia la cantidad del material de refuerzo y de resina epóxica para su instalación; en la Tabla 5-13 se resume esta información con los valores de las variables que cambian en el cálculo.

Tabla 5-13 Resumen de costos de muros existentes y nuevos (proyecto) reforzados con CFRP

Muro Nuevo	Material de refuerzo (m²)	Resina epóxica (kg)	Costo (\$/m²)
R-G-L	2.08	2.50	\$ 232,838
R-G-C	1.23	1.48	\$ 278,203
R-D-L	1.1	1.32	\$ 152,049
R-D-C	0.8	0.96	\$ 206,991
Promedio =			\$ 217,520

Muro Existente	Material de refuerzo (m²)	Resina epóxica (kg)	Costo (\$/m²)
R-G-L	2.08	2.50	\$ 193,951
R-G-C	1.23	1.48	\$ 245,164
R-D-L	1.1	1.32	\$ 113,163
R-D-C	0.8	0.96	\$ 173,952
Promedio =			\$ 181,558

Los costos calculados anteriormente pueden ser comparados con los costos del sistema de reforzamiento de mortero y malla electrosoldada reportados en la investigación de (S. López, 2013) realizada en la Escuela Colombiana de Ingeniería; en ella se muestra que el costo por m² de reforzar un muro con mortero y malla electrosoldada es de \$94.790; si se

adapta este valor del 2013 (año en el que se realizó la investigación de López) al 2015, se puede estimar que el costo está por el orden de \$100,000/m²; al comparar este resultado con los obtenidos anteriormente para sistema de reforzamiento con materiales compuestos (CFRP) se observa a simple vista este último presenta unos costos mucho más elevados que el sistema convencional de mortero y malla electrosoldada; sin embargo es importante recordar algunos aspectos mencionados en el capítulo 2 como son el fácil manejo e instalación de este sistema de reforzamiento, requiere de menos demoliciones, es una técnica no invasiva dando como resultado una menor producción de polvo, ruido y escombros y mínimos cambios en la apariencia de la estructura; la perturbación de los ocupantes y la pérdida de espacio útil también se reducen al mínimo; de igual manera, las propiedades dinámicas de la estructura existente no se modifican debido a que hay poca adición de peso y su rigidez no se altera. Estos factores, que no se encuentran en un sistema de reforzamiento convencional, pueden de alguna manera sopesar el elevado costo que por ahora tienen estos materiales y finalmente convertir el reforzamiento de edificaciones con materiales compuestos en una alternativa muy fuerte frente a los sistemas convencionales.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el proyecto de investigación se presentan las siguientes conclusiones:

- Los tejidos de fibra de carbono usados en el reforzamiento estructural contribuye significativamente a mejorar el desempeño de estas edificaciones frente a solicitaciones de diferente índole, en especial, las producidas por sismos, siempre y cuando se tengan adecuados sistemas de anclaje; tanto en los ensayos monotónicos como dinámicos se lograron aumentos en la resistencia de hasta 18.8 veces; uno de los especímenes cortos sin refuerzo de presentó un carga de falla de 1.3 kN y el mismo espécimen reforzado alcanzó una carga de falla de 24.4 kN en el ensayo dinámico, lo cual demuestra la gran contribución del material de refuerzo.
- El modo de falla predominante en los ensayos fue la flexión; a pesar de que se quería obtener una falla por corte en los muros largos, como se supuso en algunos diseños, no fue posible lograrla debido a la ausencia de carga axial en los ensayos y a que la contribución en resistencia de la mampostería sin refuerzo fue muy baja; este modo de falla se evidenció más en los especímenes cortos con relación de esbeltez de 1.54; en los especímenes largos inicialmente se formó la falla buscada pero al final se impuso la falla por flexión.
- El uso de FRP como material de refuerzo disminuyó la falla frágil en los muros, el modo de falla se caracterizó por la formación de una grieta principal y la posterior aparición de pequeñas fisuras en las unidades y juntas de pega.
- Para que se cumplan las ecuaciones y principios establecidos en el Documento ACI 440.7R-10 es importante garantizar que el anclaje del muro a su cimentación cumpla su función de monolitismo y transferencia de cargas entre los dos elementos; de los

diferentes sistemas de anclaje estudiados sólo el No. 4 fue el de mejor desempeño ya que logró que los tejidos de FRP trabajaran a su máxima capacidad; esto demuestra que este material de refuerzo y el concreto reforzado (material con el que estaba construido dicho anclaje) trabajan en conjunto adecuadamente.

- En los especímenes con configuración de reforzamiento en diagonal se logró la rotura de la fibra mientras que los de la configuración en grilla presentaron una falla en su anclaje; de igual manera, la configuración en diagonal presenta un mejor desempeño en cuanto carga máxima y área de refuerzo, pues aunque los muros en grilla soportaron una carga máxima mayor requirieron de mayor cuantía de refuerzo; sin embargo en cuanto a distribución de grietas y disminución de la falla frágil la configuración en grilla tuvo un mejor comportamiento.
- En cuanto a desplazamiento se encontró que los especímenes tienen un comportamiento elástico hasta aproximadamente una deriva del 0.5%, de ahí en adelante mantienen un comportamiento inelástico hasta alcanzar un desplazamiento máximo entre 1.5% y 2.0% de deriva; esto indica que en cuanto a ductilidad se encuentra un valor de R_0 de aproximadamente 2.9, recordando que parte de este aporte se debe a los anclajes de acero en la base del muro; por esta razón, y teniendo en cuenta que se requiere de un mayor número de ensayos para poder determinar con certeza este valor, se recomienda para fines investigativos un valor de R_0 entre 1.5 y 2.0.
- La rigidez de los especímenes reforzados en diagonal es menor de que la de los reforzados en grilla; a pesar de que uno de los muros en diagonal tuvo en algunos puntos una rigidez mayor, el porcentaje de degradación en estos últimos es mucho mayor que en los especímenes reforzados en grilla; en una deriva del 1.0% la degradación de los muros en grilla no llegó al 30% mientras que en los reforzados en diagonal alcanzó valores de hasta el 57%; por esta razón la configuración de refuerzo en diagonal no es muy recomendada en elementos donde predomine la falla por flexión.
- Debido a las lecturas de deformación en la fibra atípicas reportadas por el equipo, no fue posible conocer y hacer un análisis más exhaustivo del estado final de deformación y esfuerzo en la fibra al momento de su rotura.

- El factor de seguridad encontrado en el diseño de estos elementos fue de 1.52, sin tener en cuenta los valores más bajos de 1.20 de los especímenes cortos con configuración de refuerzo en diagonal; esto demuestra que los principios asumidos en la guía de diseño tomada como referencia está por el lado de la seguridad estructural y que la configuración de reforzamiento en diagonal para elementos esbeltos no se recomienda.
- Según el ejercicio de aplicación estudiado, este sistema de reforzamiento está en capacidad de resistir las solicitaciones sísmicas a las que estarían sometidos los elementos de una edificación típica construida de muros de mampostería de similares características a las de los utilizados en esta investigación, siempre y cuando se logre garantizar la adecuada transmisión de esfuerzos a la cimentación o entrepiso.
- A pesar de que el sistema de reforzamiento con materiales compuestos presenta unos costos más elevados al ser comparado con sistemas de reforzamiento convencionales, tiene una serie de ventajas que de alguna manera pueden hacer que el costo no sea la única razón a la hora de seleccionar una solución de reforzamiento.
- A partir de las investigaciones realizadas no es posible realizar muchas comparaciones con respecto a resultados puntuales obtenidos en esta investigación, ya que como se indicó finalizando el capítulo 2, dichas investigaciones fueron realizadas utilizando carga axial en sus ensayos y no se hace mención al estudio de los sistemas de anclaje utilizados, principalmente porque la carga axial restringe el desempeño de esos sistemas. Sin embargo, es importante resaltar que como comparación general, se demuestra que los materiales compuestos si mejoran la capacidad de carga de este tipo de elementos y se logra una falla menos frágil.

6.2 Recomendaciones

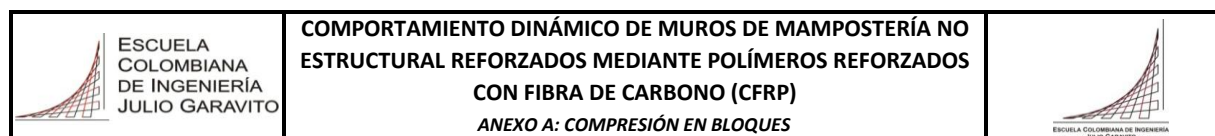
A continuación se presentan una serie de recomendaciones que se podrían hacer en un futuro con el fin de profundizar y fortalecer algunos aspectos de esta investigación o a la hora de emprender investigaciones similares.

- Para lograr la falla por corte en los ensayos descritos en esta investigación es importante tratar de incluir en los mismos la solicitación por carga axial, de lo contrario,

la falla por flexión será la predominante en este tipo de investigaciones; de igual manera, el uso de especímenes con relaciones de esbeltez mayores a 1.0 tampoco facilitan la obtención de esta falla, por lo que se recomienda el uso de elementos que tenga mayor longitud que altura.

- De acuerdo con el modo de falla de algunos de los especímenes, donde estos intentaron volcarse alrededor de su eje longitudinal, se recomienda realizar ensayos en muros reforzados por ambas caras para evitar la asimetría del refuerzo en el elemento y analizar igualmente como afecta este aumento del material de refuerzo a la capacidad de carga última, el modo de falla, la ductilidad, la rigidez y demás propiedades estudiadas.
- Se recomienda desarrollar investigaciones utilizando especímenes de características similares pero evaluando la capacidad de los mismos frente a cargas fuera del plano y de esta manera estudiar cómo sería el desempeño de estos elementos frente a esta sollicitación.
- Como se observó en el desarrollo del proyecto, los anclajes del material de refuerzo son fundamentales para garantizar el adecuado funcionamiento de los elementos; por esta razón, se recomienda desarrollar investigaciones que estén enfocadas solo en ese aspecto donde se profundicen los sistemas de anclaje estudiados en esta investigación y se estudien diferentes variables; por ejemplo el sistema de anclaje de corbatines puede estudiarse con una mayor redundancia de los mismos, con profundidades de anclaje, áreas de refuerzo y longitudes de traslapo diferentes; el uso de barras de FRP ancladas en la base del muro junto con los tejidos de fibra también es otro sistema que vale la pena estudiar.
- Es importante también desarrollar investigaciones donde se realice un análisis numérico por elementos finitos de este tipo estructuras y se pueda corroborar con los resultados obtenidos experimentalmente; de esta manera, se podrán definir parámetros y variables a la hora de modelar y diseñar este tipo de reforzamientos con la ayuda de herramientas computacionales.

A. Anexo: Compresión en bloques

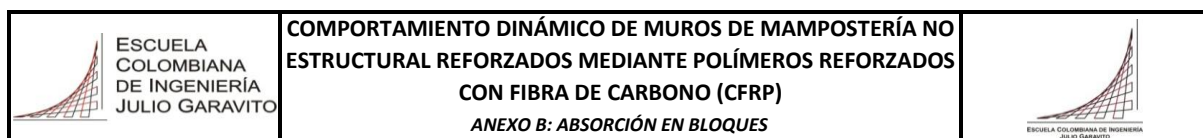


Resultado del ensayo de compresión realizado sobre muestras de Bloque No. 5 Estándar de 30x20x12 cm.

Muestra No.	Dimensiones (cm)			Carga rotura (kg)	Area (cm ²)	Resistencia		
	Alto	Largo	Ancho			kg/cm ²	lb/pulg ²	MPa
1	19.7	30.0	11.8	36000	354	102	1447	10.0
2	19.8	29.8	11.5	45000	343	131	1868	12.9
3	19.8	29.6	12.0	45400	355	128	1818	12.5
4	20.0	29.8	11.6	21600	346	62	889	6.1
5	19.7	29.9	12.0	27600	359	77	1094	7.5
PROMEDIO						100.0	1423	9.8
DISPERSIÓN (%)						30.4		

NORMA DE REFERENCIA: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4017

B. Anexo: Absorción en bloques

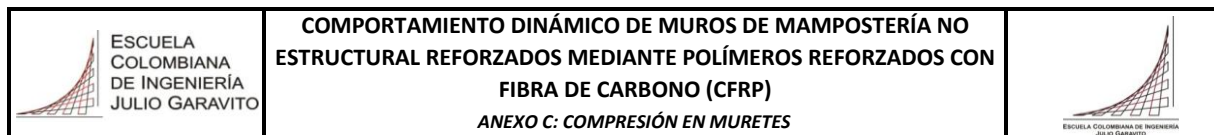


Resultado del ensayo de Absorción en Frío realizado sobre muestras de Bloque No. 5 Estándar de 30x20x12 cm.

Muestra No.	Peso Seco (gr)	Peso Saturado (gr)	Absorción en frío (%)
1	5392	5962	11
2	5350	5718	7
3	5394	5844	8
4	5301	5822	10
5	5332	5558	4
		PROMEDIO	8.0
		DISPERSIÓN (%)	31.7

NORMA DE REFERENCIA: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4017

C. Anexo: Compresión en muretes



Resultado del ensayo de compresión en muretes realizado sobre muestras formadas por Bloque No. 5 Estándar de 30x20x12 cm.

Muestra No.	Dimensiones (cm)			Carga rotura, kg	Relación h/a	Area cm ²	Resistencia*		
	Alto, h	Largo, l	Ancho, a				kg/cm ²	Lb/pulg ²	MPa
1	41.4	46.0	12.0	18770	3.5	552	37.6	535	3.7
2	42.0	45.6	11.6	28150	3.6	529	59.6	848	5.8
5	42.0	45.0	11.8	30400	3.6	531	63.8	908	6.3

*Resistencia corregida por relación altura/ancho (h/a)

h/a	1.5	2	2.5	3	4	5
Fac Corr	0.8	1	1.04	1.07	1.15	1.22

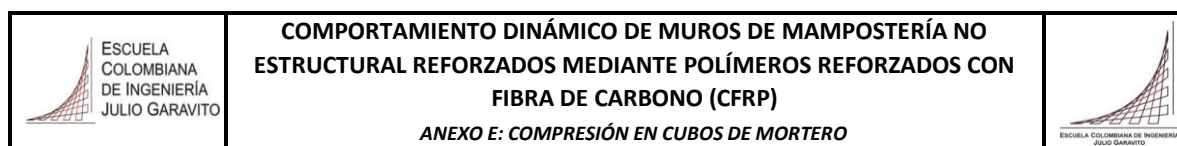
f'm =

5.3 MPa

NORMA DE REFERENCIA: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 3495

D. Anexo: Módulo de elasticidad de la mampostería

E. Anexo: Compresión en cubos de mortero

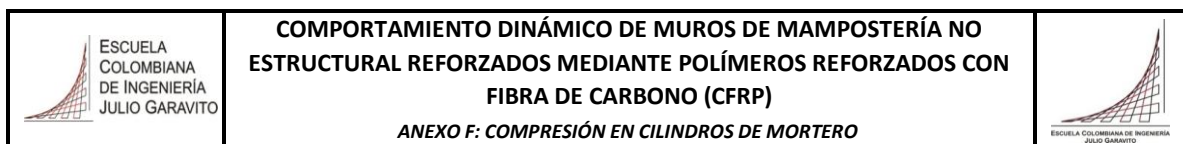


Resultado del ensayo de compresión realizado sobre muestras de cubos de mortero de pega de 5.0 cm de lado.

Mtra. No.	Fecha	Fecha	Edad (días)	Identificación	Carga (kg)	Lado (cm)	RESISTENCIA		
	Fundido	Ensayo					kg/cm ²	psi	MPa
1	20-jun-14	23-jun-14	3	Tipo M F.S=1.2	2200	5.0	88.0	1252	8.6
2	20-jun-14	23-jun-14	3	Tipo M F.S=1.2	2300	5.0	92.0	1309	9.0
3	20-jun-14	27-jun-14	7	Tipo M F.S=1.2	3400	5.0	136.0	1935	13.3
4	20-jun-14	27-jun-14	7	Tipo M F.S=1.2	3600	5.0	144.0	2048	14.1
5	20-jun-14	18-jul-14	28	Tipo M F.S=1.2	4800	5.0	192.0	2731	18.8
6	20-jun-14	18-jul-14	28	Tipo M F.S=1.2	5000	5.0	200.0	2845	19.6
7	26-jun-14	30-jun-14	4	Tipo M F.S=1.5	2500	5.0	100.0	1422	9.8
8	26-jun-14	30-jun-14	4	Tipo M F.S=1.5	2400	5.0	96.0	1366	9.4
9	26-jun-14	03-jul-14	7	Tipo M F.S=1.5	3900	5.0	156.0	2219	15.3
10	26-jun-14	03-jul-14	7	Tipo M F.S=1.5	3800	5.0	152.0	2162	14.9
11	26-jun-14	24-jul-14	28	Tipo M F.S=1.5	5800	5.0	232.0	3300	22.7
12	26-jun-14	24-jul-14	28	Tipo M F.S=1.5	5700	5.0	228.0	3243	22.3
13	26-jun-14	30-jun-14	4	Tipo H F.S=1.4	3000	5.0	120.0	1707	11.8
14	26-jun-14	30-jun-14	4	Tipo H F.S=1.4	3200	5.0	128.0	1821	12.5
15	26-jun-14	03-jul-14	7	Tipo H F.S=1.4	4700	5.0	188.0	2674	18.4
16	26-jun-14	03-jul-14	7	Tipo H F.S=1.4	4600	5.0	184.0	2617	18.0
17	26-jun-14	24-jul-14	28	Tipo H F.S=1.4	6800	5.0	272.0	3869	26.7
18	26-jun-14	24-jul-14	28	Tipo H F.S=1.4	6900	5.0	276.0	3926	27.0
19	04-jul-14	07-jul-14	3	Tipo M F.S=1.3	2500	5.0	100.0	1422	9.8
20	04-jul-14	07-jul-14	3	Tipo M F.S=1.3	2600	5.0	104.0	1479	10.2
21	04-jul-14	11-jul-14	7	Tipo M F.S=1.3	3600	5.0	144.0	2048	14.1
22	04-jul-14	11-jul-14	7	Tipo M F.S=1.3	3400	5.0	136.0	1935	13.3
23	04-jul-14	01-ago-14	28	Tipo M F.S=1.3	5200	5.0	208.0	2959	20.4
24	04-jul-14	01-ago-14	28	Tipo M F.S=1.3	5300	5.0	212.0	3016	20.8

NORMA DE REFERENCIA: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 220

F. Anexo: Compresión en cilindros de mortero

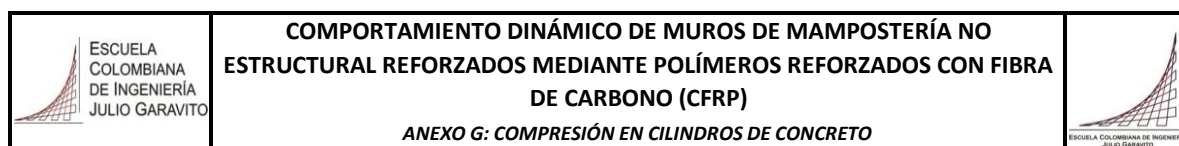


Resultado del ensayo de compresión realizado sobre muestras de cilindros de mortero de pega de 10 cm de altura por 5 cm de diámetro.

Mtra. No.	Fecha Fundido	Fecha Ensayo	Edad (días)	Identificación	Carga (kg)	Diámetro (cm)	RESISTENCIA		
							kg/cm ²	psi	MPa
1	11-jul-14	08-ago-14	28	SR-C/L-1 M. 1	4200	5.0	213.9	3043	21.0
2	11-jul-14	08-ago-14	28	SR-C/L-1 M. 1	4000	5.0	203.7	2898	20.0
3	11-jul-14	08-ago-14	28	SR-C/L-1 M. 2	4200	5.0	213.9	3043	21.0
4	17-sep-14	15-oct-14	28	R-G/D-C/L M.1	4700	5.1	230.1	3273	22.5
5	17-sep-14	15-oct-14	28	R-G/D-C/L M.1	4700	5.0	239.4	3405	23.5
6	17-sep-14	15-oct-14	28	R-G/D-C/L M.2	5700	5.1	279.0	3969	27.3
7	08-jul-14	16-dic-14	161	R-G/D-C/L M.1	5700	5.1	279.0	3969	27.3
8	08-jul-14	16-dic-14	161	R-G/D-C/L M.2	4600	5.1	225.2	3203	22.1
9	08-jul-14	16-dic-14	161	R-G/D-C/L M.2	4300	5.1	210.5	2994	20.6
10	12-jul-14	16-dic-14	157	R-G/D-C/L M.1	6400	5.1	313.3	4457	30.7
11	12-jul-14	16-dic-14	157	R-G/D-C/L M.2	6100	5.1	298.6	4248	29.3
12	12-jul-14	16-dic-14	157	R-G/D-C/L M.2	3700	5.1	181.1	2576	17.7
13	11-dic-14	23-feb-15	74	R-G/D-C/L M.1	4200	5.1	205.6	2925	20.1
14	11-dic-14	23-feb-15	74	R-G/D-C/L M.1	4000	5.1	195.8	2785	19.2
15	11-dic-14	23-feb-15	74	R-G/D-C/L M.2	4500	5.1	220.3	3133	21.6

NORMA DE REFERENCIA: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 3546

G. Anexo: Compresión en cilindros de concreto

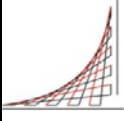
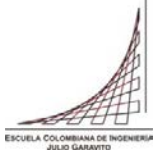


Resultado del ensayo de compresión realizado sobre muestras de cilindros de concreto.

Mtra. No.	Fecha Fundido	Fecha Ensayo	Edad (días)	Ident.	Elemento	Carga (kg)	Diámetro (cm)	RESISTENCIA		
								kg/cm ²	psi	MPa
1	20-may-14	26-sep-14	129	M1	Vigas Cimentación	27000	10.1	337.0	4794	33.0
2	20-may-14	26-sep-14	129	M2	Vigas Cimentación	25700	10.1	320.8	4563	31.4
3	20-may-14	26-sep-14	129	M3	Vigas Cimentación	28500	10.1	355.7	5060	34.9
4	20-may-14	26-sep-14	129	M4	Vigas Cimentación	26500	10.1	330.8	4705	32.4
5	20-may-14	26-sep-14	129	M5	Vigas Cimentación	26600	10.1	332.0	4723	32.5
6	20-may-14	26-sep-14	129	M6	Vigas Cimentación	26800	10.1	334.5	4758	32.8
7	26-may-14	26-sep-14	123	M1	Vigas Cimentación	24000	10.1	299.6	4261	29.4
8	26-may-14	26-sep-14	123	M2	Vigas Cimentación	26300	10.1	328.3	4669	32.2
9	24-jul-14	26-sep-14	64	M1	Vigas Borde Superior	29500	10.2	361.0	5135	35.4
10	24-jul-14	26-sep-14	64	M2	Vigas Borde Superior	29300	10.1	365.7	5202	35.8
11	07-ene-15	23-feb-15	47	M3	Vigas Borde Superior	19700	10.1	245.9	3498	24.1
12	07-ene-15	23-feb-15	47	M4	Vigas Borde Superior	21900	10.1	273.3	3888	26.8
13	09-ene-15	23-feb-15	45	M5	Vigas Borde Superior	31200	10.1	389.4	5539	38.2
14	22-oct-14	04-nov-14	13	M1	Macizos Muro	11900	7.7	255.5	3635	25.0
15	22-oct-14	04-nov-14	13	M2	Macizos Muro	11500	7.7	247.0	3513	24.2
16	15-nov-14	16-dic-14	31	M1	Macizos Muro	7600	7.7	163.2	2322	16.0
17	15-nov-14	16-dic-14	31	M2	Macizos Muro	7900	7.7	169.7	2413	16.6
18	15-nov-14	16-dic-14	31	M3	Macizos Muro	7100	7.7	152.5	2169	14.9
19	15-nov-14	16-dic-14	31	M4	Macizos Muro	7300	7.7	156.8	2230	15.4
20	26-ene-15	23-feb-15	28	M5	Macizos Muro	17000	7.7	365.1	5193	35.8
21	26-ene-15	23-feb-15	28	M6	Macizos Muro	16900	7.7	362.9	5162	35.6

NORMA DE REFERENCIA: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC 673.

H. Anexo: Diseño de muros con FRP

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP) ANEXO H: DISEÑO DEL REFORZAMIENTO - CONFIGURACIÓN EN GRILLA	 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
---	--	---

1. Alcance

La metodología que presenta esta hoja de cálculo, para el diseño del reforzamiento de muros de mampostería con materiales compuestos de FRP, se hace siguiendo los planteamientos establecidos en el documento ACI 440. 7R - 10 (Guide for the design and construction of externally bonded Fiber Reinforced Polymer Systems for strengthening unreinforced masonry structures). De igual manera, el reforzamiento que se diseñe será únicamente para muros sometidos a cargas en su plano. Para cargas fuera del plano, puede remitirse al documento ya mencionado.

2. Datos de entrada

2.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	1,90 m
Longitud del muro	L	2,47 m
Espesor del muro	t	0,12 m
Resistencia a la compresión de la mampostería	f'_m	5,3 MPa
Deformación máxima de la mampostería	ϵ_{mu}	0,0025

2.2 Propiedades mecánicas de la fibra curada

Material de la fibra		Carbono
Referencia de la fibra		SikaWrap®600C
Resina de impregnación		Adhesivo epóxico
Referencia de la resina		Sikadur® - 301
Espesor de la fibra curada	t_f	1,016 mm
Resistencia a la tensión de la fibra curada	f_{fu}^*	651 MPa
Módulo de elasticidad de la fibra curada	E_f	62354 MPa
Elongación de rotura de la fibra curada	ϵ_{fu}^*	0,0091

2.3 Información de la carga solicitada

Peso propio muro	P_D	4,34 kN/m
Carga lateral en el plano	V_u	30 kN
Carga axial	Q_G	0,0 kN/m
Carga axial actuante	P_u	6,08 kN/m

3. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería reforzada con FRP

3.1 Cálculo de la resistencia al corte de la mampostería no reforzada, V_n^{URM}

La guía ACI 440.7R-10 reconoce tres (3) modos de falla de muros de mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano: deslizamiento de la junta del mortero de pega, tensión diagonal y aplastamiento en la base del muro. En la Figura 1 se muestran estos modos de falla. Los dos primeros modos están controlados por un comportamiento a corte y el modo de falla tres está controlado por la flexión

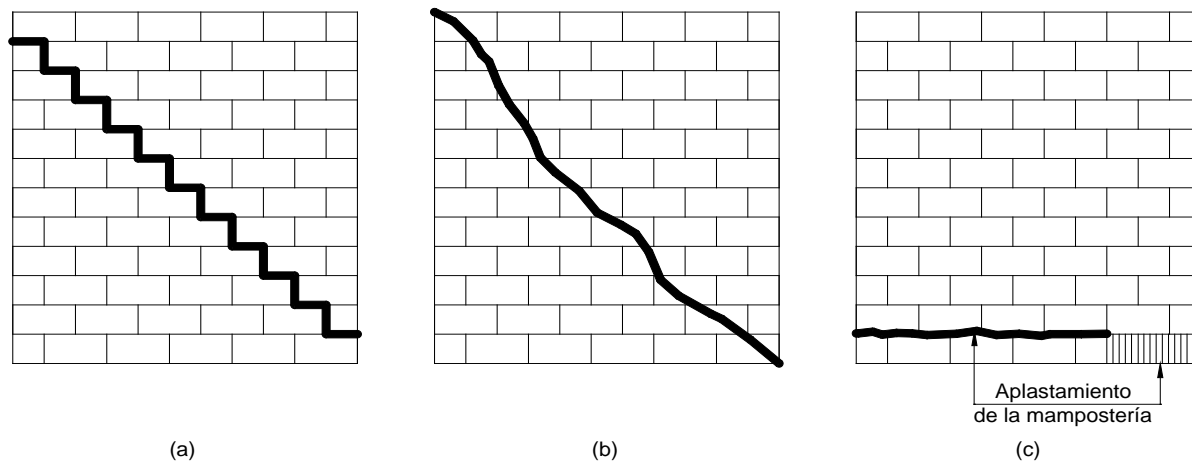


Figura 1. Modos de falla de la mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano.
 (a) Deslizamiento de la junta, (b) Tensión diagonal, (c) Aplastamiento en la base.
 Fuente: Tomado de la Guía ACI 440.7R-10. p. 23.

3.1.1 Resistencia al deslizamiento de la junta, V_{bjs}

$$V_{bjs} = v_{mL} A_n$$

Donde

$$v_{mL} = 0.75 \frac{0.75 v_{tL} + \frac{P_D}{A_n}}{1.5}$$

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

$$296400 \text{ mm}^2$$

v_{tL} = Resistencia al corte de la mampostería (No mayor a 0.70 MPa) =

$$0,10 \text{ MPa}$$

P_D = Carga muerta superpuesta =

$$4,34 \text{ kN/m}$$

v_{mL} =

$$0,056 \text{ MPa}$$

V_{bjs} =

$$16474,9 \text{ N}$$

3.1.2 Resistencia a tensión diagonal, V_{dt}

$$V_{dt} = f'_{dt} A_n \left(\frac{L}{H} \right) \sqrt{1 + \frac{f_a}{f'_{dt}}}$$

Donde

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

$$296400 \text{ mm}^2$$

$f'_{dt} = v_{tL} =$

$$0,056 \text{ MPa}$$

L = Longitud del muro =

$$2,47 \text{ m}$$

H = Altura del muro =

$$1,90 \text{ m}$$

f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga muerta = $P_D/A_n =$

$$0,036 \text{ MPa}$$

V_{dt} =

$$27517 \text{ N}$$

3.1.3 Resistencia al aplastamiento en la base, V_{tc}

$$V_{tc} = \alpha \cdot Q_G \left(\frac{L}{H} \right) \left(1 - \frac{f_a}{0.7 f'_m} \right)$$

Donde

$\alpha =$

$$1,0$$

$f'_m =$

$$5,3 \text{ MPa}$$

L = Longitud del muro =	2,47 m
H = Altura del muro =	1,90 m
f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga axial = Q_G/A_n =	0,036 MPa
V_{tc} =	13800 N

3.1.4 Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada, ϕV_n^{URM}

$$V_n^{URM} = \min(V_{bjs}, V_{dt})$$

$$V_n^{URM} =$$

16475 N

Asumiento $\phi = 0,8$

$$\phi V_n^{URM} =$$

13180 N

¡Se requiere reforzamiento por corte!

4. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

Coeficiente de reducción ambiental (Tabla 8.1 Guía ACI 440.7R - 10)

 C_E

0,85

4.1 Esfuerzo último de tensión del FRP, f_{fu}

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

Donde,

 f_{fu}^* = Esfuerzo último del FRP reportado por el fabricante

651 MPa

 f_{fu} =

553,4 MPa

4.2 Deformación última de tensión del FRP, ϵ_{fu}

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

Donde,

 ϵ_{fu}^* = Deformación última del FRP reportada por el fabricante

0,0091

 ϵ_{fu} =

0,0077

5. Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por corte

$$\epsilon_{fe} = K_v \epsilon_{fu}^* \leq C_E \epsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Donde,

 E_f = Módulo elástico de la fibra curada

62354 MPa

$$K_v = \begin{cases} 0.40 & \text{si } \omega_f \leq 0.20 \\ 0.64 - 1.2\omega_f & \text{si } 0.20 < \omega_f \leq 0.45 \\ 0.1 & \text{si } \omega_f > 0.45 \end{cases}$$

$$\omega_f = \frac{1}{85} \frac{A_f E_f}{A_n \sqrt{f'_m}}$$

 A_f = Área total de la sección transversal del FRP colocado en todo el muro

$$A_f = \frac{H}{s} n t_f w_f$$

n = Número de capas de FRP para reforzamiento en corte	1
w_f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en corte	100 mm
s = Separación centro a centro del FRP	400 mm
A_f =	482,6 mm ²
ω_f = Índice de refuerzo del FRP =	0,519
K_v =	0,1000
ϵ_{fe} =	0,0009 ¡OK!
f_{fe} =	56,7 MPa

6. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, V_f

La fuerza por unidad de ancho en el FRP no debe exceder lo siguiente:

$$P_{fv} = n t_f f_{fe} \leq 260 \text{ N/mm}$$

P_{fv} = Fuerza por unidad de ancho en el FRP =

$$57,65 \text{ N/mm}$$

¡OK!

$$V_f = P_{fv} w_f \frac{d_v}{s}$$

d_v = Profundidad efectiva de la mampostería para los cálculos de cortante = $\min(H, L)$ =

$$1900 \text{ mm}$$

V_f =

$$27384 \text{ N}$$

7. Cálculo de la resistencia nominal al corte del muro con el FRP, $V_{n,s}$

$$V_{n,s} = V_n^{URM} + V_f$$

$V_{n,s}$ =

$$43859 \text{ N}$$

8. Cálculo de la resistencia nominal a flexión del muro con el FRP, M_n

La Figura 2 presenta el esquema del reforzamiento de muros con FRP controlados por la flexión.

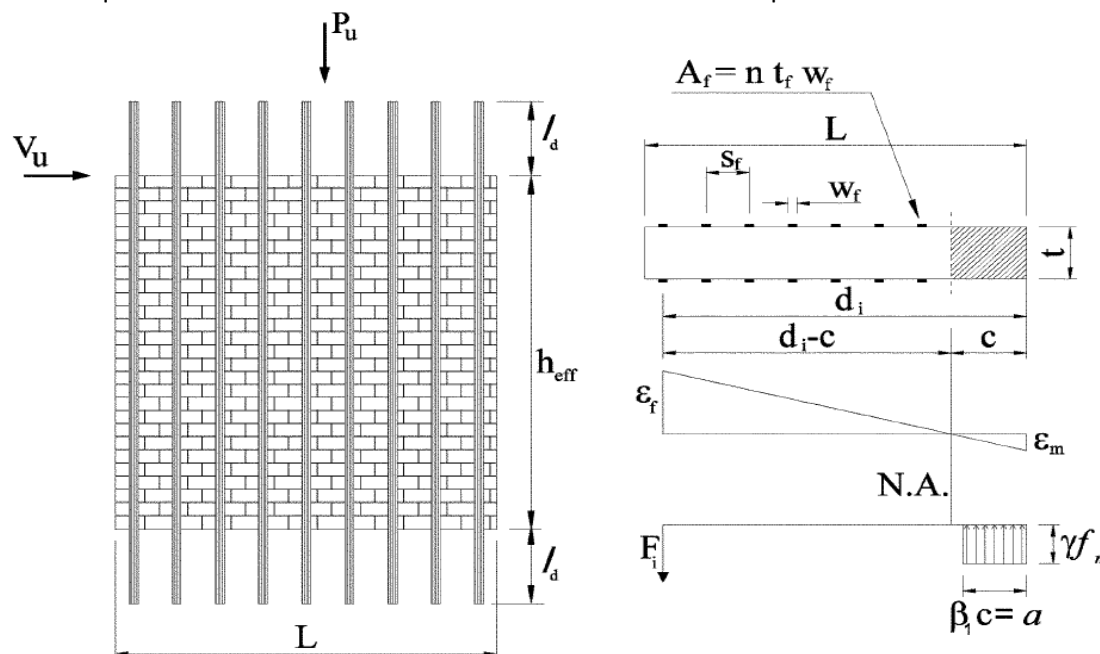


Figura 2. Esquema del reforzamiento de muros con FRP controlados por la flexión

Fuente: Tomado de la Guía ACI 440.7R-10. p. 25.

Número de bandas a colocar	N	2
Separación centro a centro de la fibra	S _f	2170 mm
n = Número de capas de FRP para reforzamiento en flexión		1
w _f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en flexión		150 mm

8.1 Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por la flexión

$$\epsilon_{fe} = K_m \epsilon_{fu}^* \leq C_E \epsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

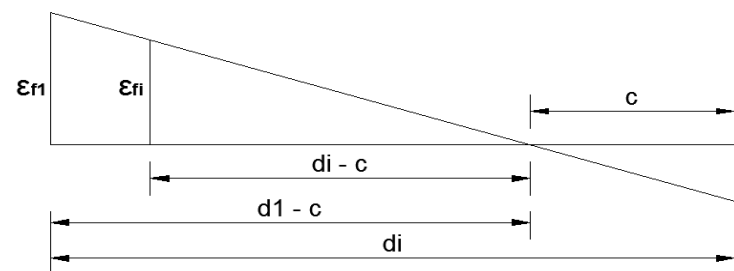
Donde,

E _f = Módulo elástico de la fibra curada	62354 MPa
K _m =	0,45
ε _{fe} =	0,00410 ¡Ok!
f _{fe} =	255,3 MPa

8.2 Distancias de la fibra de FRP a la fibra extrema en compresión, d_i

	d ₁ =	2320 mm
	d ₂ =	150 mm
	d ₃ =	- mm
	d ₄ =	- mm
	d ₅ =	- mm
	d ₆ =	- mm
	d _N =	- mm
Profundidad del eje neutro	c	111,2 mm
Relación entre la profundidad del rectángulo de compresiones y el eje neutro	β ₁	0,8
Profundidad del rectángulo de compresiones	a	89 mm
	d ₁ - c	2208,8 mm
	d ₂ - c	38,8 mm
	d ₃ - c	- mm
	d ₄ - c	- mm
	d ₅ - c	- mm
	d ₆ - c	- mm
	d _N - c	- mm

8.3 Deformaciones en la fibra de FRP, ε_{fi}



$$\epsilon_{fi} = \frac{\epsilon_{f1} (d_i - c)}{d_1 - c}$$

ε _{f1}	0,0041
ε _{f2}	0,0001
ε _{f3}	-
ε _{f4}	-
ε _{f5}	-
ε _{f6}	-
ε _{fN}	-

8.4 Fuerzas en la fibra de FRP, F_{fi}

$$F_{fi} = n t_f w_f E_f \varepsilon_{fi}$$

F_{f1}	38913,8 N
F_{f2}	683,9 N
F_{f3}	- N
F_{f4}	- N
F_{f5}	- N
F_{f6}	- N
F_{fn}	- N

8.5 Verificación de c

$$C = \sum F_{fi} = \gamma \cdot f'_m \cdot a \cdot t$$

$\gamma =$

t = Espesor del muro

C = Resultante del rectángulo de compresiones =

$\sum F_{fi} =$

$C - \sum F_{fi} = 0$

0,7

120 mm

39597,7 N

39597,7 N

0,0 N

¡Valor de c es correcto!

8.6 Cálculo del momento, M_n

$$M_n = \sum F_i \left(d_i - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + P_u \left(\frac{L}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$M_n =$

106489 N·m

8.7 Cálculo de la máxima fuerza lateral que resiste el muro antes de que falle por flexión, $V_{n,f}$

$$V_{n,f} = \frac{M_n}{k \cdot H}$$

$k = (k = 0.5 \text{ Muro Fijo - Fijo}, k = 1.0 \text{ Muro Fijo - libre})$

$V_{n,f} =$

Se requiere que $V_{n,f} > V_{n,s}$ para que la falla se presente primero por corte y no por flexión.

1,0

56047 N

Falla por corte

9. Cálculo de la resistencia lateral de diseño del muro con el FRP, ϕV_n

$V_n = \text{mín}(V_{n,s}, V_{n,f})$

$\phi =$

$\phi V_n =$

43859 N

0,8

35087 N

$\phi V_n > V_u$ ¡Ok!

10. Cálculo de la longitud de desarrollo, l_d

$$l_d = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{tm}}}$$

Donde,

$E_f =$ Módulo de elasticidad de la fibra curada

$t_f =$ Espesor de la fibra curada

$f_{tm} =$ Resistencia a la tracción de la mampostería (Puede tomarse como $10\% f'_m$) =

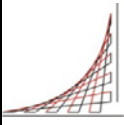

$l_d =$

62354 MPa

1,016 mm

0,53 MPa

245 mm

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP) ANEXO H: DISEÑO DEL REFORZAMIENTO - CONFIGURACIÓN EN GRILLA	 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
---	--	---

1. Alcance

La metodología que presenta esta hoja de cálculo, para el diseño del reforzamiento de muros de mampostería con materiales compuestos de FRP, se hace siguiendo los planteamientos establecidos en el documento ACI 440. 7R - 10 (Guide for the design and construction of externally bonded Fiber Reinforced Polymer Systems for strengthening unreinforced masonry structures). De igual manera, el reforzamiento que se diseñe será únicamente para muros sometidos a cargas en su plano. Para cargas fuera del plano, puede remitirse al documento ya mencionado.

2. Datos de entrada

2.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	1,90 m
Longitud del muro	L	1,23 m
Espesor del muro	t	0,12 m
Resistencia a la compresión de la mampostería	f'_m	5,3 MPa
Deformación máxima de la mampostería	ϵ_{mu}	0,0025

2.2 Propiedades mecánicas de la fibra curada

Material de la fibra		Carbono
Referencia de la fibra		SikaWrap®600C
Resina de impregnación		Adhesivo epóxico
Referencia de la resina		Sikadur® - 301
Espesor de la fibra curada	t_f	1,016 mm
Resistencia a la tensión de la fibra curada	f_{fu}^*	651 MPa
Módulo de elasticidad de la fibra curada	E_f	62354 MPa
Elongación de rotura de la fibra curada	ϵ_{fu}^*	0,0091

2.3 Información de la carga solicitada

Peso propio muro	P_D	4,34 kN/m
Carga lateral en el plano	V_u	8 kN
Carga axial	Q_G	0,0 kN/m
Carga axial actuante	P_u	6,08 kN/m

3. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería reforzada con FRP

3.1 Cálculo de la resistencia al corte de la mampostería no reforzada, V_n^{URM}

La guía ACI 440.7R-10 reconoce tres (3) modos de falla de muros de mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano: deslizamiento de la junta del mortero de pega, tensión diagonal y aplastamiento en la base del muro. En la Figura 1 se muestran estos modos de falla. Los dos primeros modos están controlados por un comportamiento a corte y el modo de falla tres está controlado por la flexión

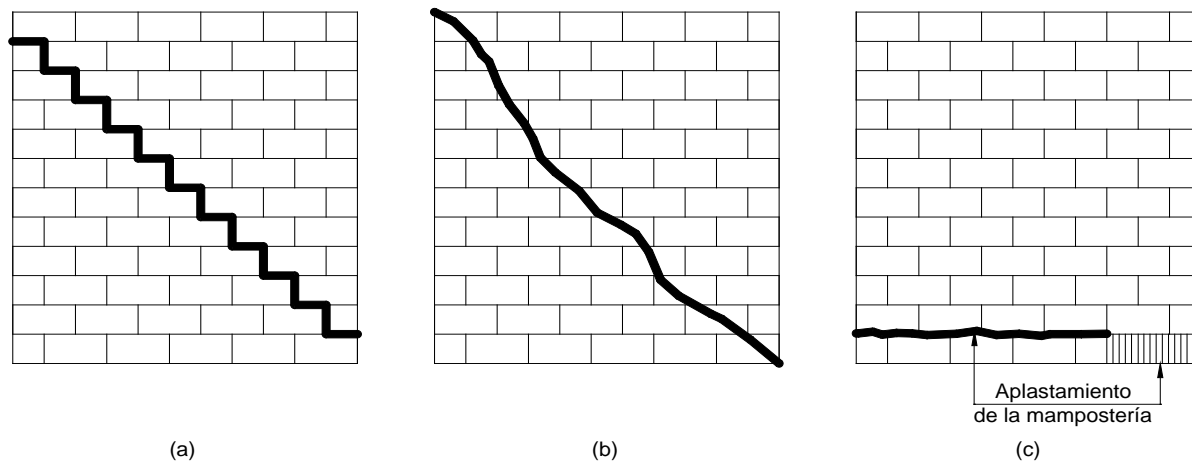


Figura 1. Modos de falla de la mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano.
 (a) Deslizamiento de la junta, (b) Tensión diagonal, (c) Aplastamiento en la base.
 Fuente: Tomado de la Guía ACI 440.7R-10. p. 23.

3.1.1 Resistencia al deslizamiento de la junta, V_{bjs}

$$V_{bjs} = v_{mL} A_n$$

Donde

$$v_{mL} = 0.75 \frac{0.75 v_{tL} + \frac{P_D}{A_n}}{1.5}$$

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

$$147600 \text{ mm}^2$$

v_{tL} = Resistencia al corte de la mampostería (No mayor a 0.70 MPa) =

$$0,10 \text{ MPa}$$

P_D = Carga muerta superpuesta =

$$4,3 \text{ kN/m}$$

v_{mL} =

$$0,056 \text{ MPa}$$

V_{bjs} =

$$8204,1 \text{ N}$$

3.1.2 Resistencia a tensión diagonal, V_{dt}

$$V_{dt} = f'_{dt} A_n \left(\frac{L}{H} \right) \sqrt{1 + \frac{f_a}{f'_{dt}}}$$

Donde

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

$$147600 \text{ mm}^2$$

$f'_{dt} = v_{tL} =$

$$0,056 \text{ MPa}$$

L = Longitud del muro =

$$1,23 \text{ m}$$

H = Altura del muro =

$$1,90 \text{ m}$$

f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga muerta = $P_D/A_n =$

$$0,036 \text{ MPa}$$

V_{dt} =

$$6824 \text{ N}$$

3.1.3 Resistencia al aplastamiento en la base, V_{tc}

$$V_{tc} = \alpha \cdot Q_G \left(\frac{L}{H} \right) \left(1 - \frac{f_a}{0.7 f'_m} \right)$$

Donde

$\alpha =$

$$1,0$$

$f'_m =$

$$5,3 \text{ MPa}$$

L = Longitud del muro =	1,23 m
H = Altura del muro =	1,90 m
f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga axial = Q_G/A_n =	0,036 MPa
V_{tc} =	3422 N

3.1.4 Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada, ϕV_n^{URM}

$$V_n^{URM} = \min(V_{bjs}, V_{dt})$$

$$V_n^{URM} =$$

6824 N

Asumiento $\phi = 0,8$

$$\phi V_n^{URM} =$$

5459 N

¡Se requiere reforzamiento por corte!

4. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

Coeficiente de reducción ambiental (Tabla 8.1 Guía ACI 440.7R - 10)

 C_E

0,85

4.1 Esfuerzo último de tensión del FRP, f_{fu}

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

Donde,

 f_{fu}^* = Esfuerzo último del FRP reportado por el fabricante

651 MPa

 f_{fu} =

553,4 MPa

4.2 Deformación última de tensión del FRP, ϵ_{fu}

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

Donde,

 ϵ_{fu}^* = Deformación última del FRP reportada por el fabricante

0,0091

 ϵ_{fu} =

0,0077

5. Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por corte

$$\epsilon_{fe} = K_v \epsilon_{fu}^* \leq C_E \epsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Donde,

 E_f = Módulo elástico de la fibra curada

62354 MPa

$$K_v = \begin{cases} 0.40 & \text{si } \omega_f \leq 0.20 \\ 0.64 - 1.2\omega_f & \text{si } 0.20 < \omega_f \leq 0.45 \\ 0.1 & \text{si } \omega_f > 0.45 \end{cases}$$

$$\omega_f = \frac{1}{85} \frac{A_f E_f}{A_n \sqrt{f'_m}}$$

 A_f = Área total de la sección transversal del FRP colocado en todo el muro

$$A_f = \frac{H}{s} n t_f w_f$$

n = Número de capas de FRP para reforzamiento en corte	1
w_f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en corte	100 mm
s = Separación centro a centro del FRP	400 mm
A_f =	482,6 mm ²
ω_f = Índice de refuerzo del FRP =	1,042
K_v =	0,1000
ϵ_{fe} =	0,0009 ¡OK!
f_{fe} =	56,7 MPa

6. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, V_f

La fuerza por unidad de ancho en el FRP no debe exceder lo siguiente:

$$P_{fv} = n t_f f_{fe} \leq 260 N/mm$$

P_{fv} = Fuerza por unidad de ancho en el FRP =

57,65 N/mm
¡OK!

$$V_f = P_{fv} w_f \frac{d_v}{s}$$

d_v = Profundidad efectiva de la mampostería para los cálculos de cortante = $\min(H, L)$ =

1230 mm

V_f =

17727 N

7. Cálculo de la resistencia nominal al corte del muro con el FRP, $V_{n,s}$

$$V_{n,s} = V_n^{URM} + V_f$$

$V_{n,s}$ =

24551 N

8. Cálculo de la resistencia nominal a flexión del muro con el FRP, M_n

La Figura 2 presenta el esquema del reforzamiento de muros con FRP controlados por la flexión.

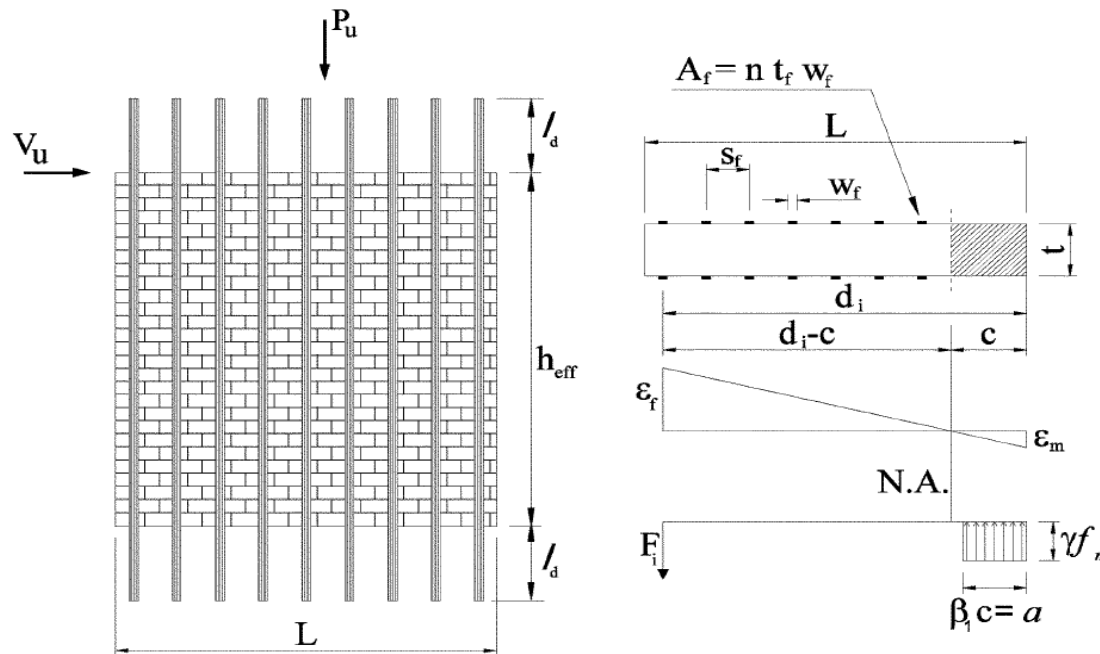


Figura 2. Esquema del reforzamiento de muros con FRP controlados por la flexión
Fuente: Tomado de la Guía ACI 440.7R-10. p. 25.

Número de bandas a colocar	N	2
Separación centro a centro de la fibra	S _f	930 mm
n = Número de capas de FRP para reforzamiento en flexión		1
w _f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en flexión		100 mm

8.1 Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por la flexión

$$\epsilon_{fe} = K_m \epsilon_{fu}^* \leq C_E \epsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Donde,

$E_f =$ Módulo elástico de la fibra curada	62354 MPa
--	-----------

$K_m =$	0,45
---------	------

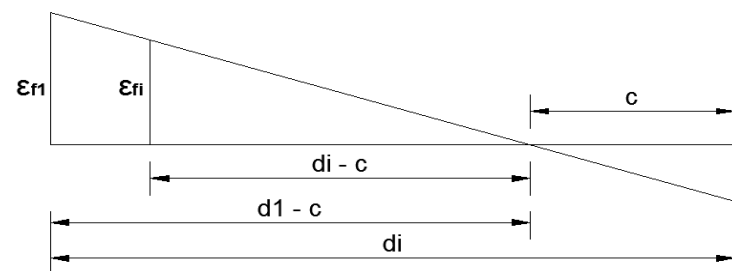
$\epsilon_{fe} =$	0,00410 ¡Ok!
-------------------	--------------

$f_{fe} =$	255,3 MPa
------------	-----------

8.2 Distancias de la fibra de FRP a la fibra extrema en compresión, d_i

$d_1 =$	1080 mm
$d_2 =$	150 mm
$d_3 =$	- mm
$d_4 =$	- mm
$d_5 =$	- mm
$d_6 =$	- mm
$d_N =$	- mm
Profundidad del eje neutro	c = 78,1 mm
Relación entre la profundidad del rectángulo de compresiones y el eje neutro	$\beta_1 = 0,8$
Profundidad del rectángulo de compresiones	a = 62 mm
$d_1 - c$	1001,9 mm
$d_2 - c$	71,9 mm
$d_3 - c$	- mm
$d_4 - c$	- mm
$d_5 - c$	- mm
$d_6 - c$	- mm
$d_N - c$	- mm

8.3 Deformaciones en la fibra de FRP, ϵ_{fi}



$$\epsilon_{fi} = \frac{\epsilon_{f1} (d_i - c)}{d_1 - c}$$

ϵ_{f1}	0,0041
ϵ_{f2}	0,0003
ϵ_{f3}	-
ϵ_{f4}	-
ϵ_{f5}	-
ϵ_{f6}	-
ϵ_{fN}	-

8.4 Fuerzas en la fibra de FRP, F_{fi}

$$F_{fi} = n t_f w_f E_f \varepsilon_{fi}$$

F_{f1}	25942,5 N
F_{f2}	1862,5 N
F_{f3}	- N
F_{f4}	- N
F_{f5}	- N
F_{f6}	- N
F_{fn}	- N

8.5 Verificación de c

$$C = \sum F_{fi} = \gamma \cdot f'_m \cdot a \cdot t$$

$\gamma =$

t = Espesor del muro

C = Resultante del rectángulo de compresiones =

$\sum F_{fi} =$

$C - \sum F_{fi} = 0$

0,7

120 mm

27805,0 N

27805,0 N

0,0 N

¡Valor de c es correcto!

8.6 Cálculo del momento, M_n

$$M_n = \sum F_i \left(d_i - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + P_u \left(\frac{L}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$M_n =$

31792 N·m

8.7 Cálculo de la máxima fuerza lateral que resiste el muro antes de que falle por flexión, $V_{n,f}$

$$V_{n,f} = \frac{M_n}{k \cdot H}$$

$k = (k = 0.5 \text{ Muro Fijo - Fijo}, k = 1.0 \text{ Muro Fijo - libre})$

$V_{n,f} =$

Se requiere que $V_{n,f} > V_{n,s}$ para que la falla se presente primero por corte y no por flexión.

1,0

16733 N

Falla por flexión

9. Cálculo de la resistencia lateral de diseño del muro con el FRP, ϕV_n

$V_n = \text{mín}(V_{n,s}, V_{nf})$

$\phi =$

$\phi V_n =$

16733 N

0,6

10040 N

$\phi V_n > V_u$ ¡Ok!

10. Cálculo de la longitud de desarrollo, l_d

$$l_d = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{tm}}}$$

Donde,

$E_f =$ Módulo de elasticidad de la fibra curada

$t_f =$ Espesor de la fibra curada

$f_{tm} =$ Resistencia a la tracción de la mampostería (Puede tomarse como $10\% f'_m$) =

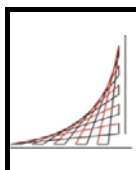
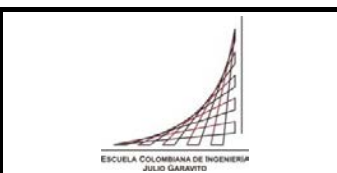
$l_d =$

62354 MPa

1,016 mm

0,53 MPa

245 mm

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP)</p> <p>ANEXO H: DISEÑO DEL REFORZAMIENTO - CONFIGURACIÓN EN DIAGONAL</p>	 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>
--	---	--

1. Alcance

La metodología que presenta esta hoja de cálculo, para el diseño del reforzamiento de muros de mampostería con materiales compuestos de FRP, se hace siguiendo algunos planteamientos establecidos en el documento ACI 440. 7R - 10 (Guide for the design and construction of externally bonded Fiber Reinforced Polymer Systems for strengthening unreinforced masonry structures), ya que esta guía no considera la colocación de la fibra en forma diagonal. Sin embargo, aplicando los principios de la estática de descomposición de fuerzas se hace el respectivo diseño del reforzamiento a corte y flexión de los muros.

2. Datos de entrada

2.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	1,90 m
Longitud del muro	L	2,47 m
Espesor del muro	t	0,12 m
Resistencia a la compresión de la mampostería	f'_m	5,3 MPa
Deformación máxima de la mampostería	ϵ_{mu}	0,0025

2.2 Propiedades mecánicas de la fibra curada

Material de la fibra	Carbono	
Referencia de la fibra	SikaWrap®600C	
Resina de impregnación	Adhesivo epóxico	
Referencia de la resina	Sikadur® - 301	
Espesor de la fibra curada	t_f	1,016 mm
Resistencia a la tensión de la fibra curada	f_{fu}^*	651 MPa
Módulo de elasticidad de la fibra curada	E_f	62354 MPa
Elongación de rotura de la fibra curada	ϵ_{fu}^*	0,0091

2.3 Información de la carga solicitada

Peso propio muro	P_D	4,34 kN/m
Carga lateral en el plano	V_u	18 kN
Carga axial	Q_G	0,0 kN/m
Carga axial actuante	P_u	6,08 kN/m

3. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería reforzada con FRP

3.1 Cálculo de la resistencia al corte de la mampostería no reforzada, V_n^{URM}

La guía ACI 440.7R-10 reconoce tres (3) modos de falla de muros de mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano: deslizamiento de la junta del mortero de pega, tensión diagonal y aplastamiento en la base del muro. En la Figura 1 se muestran estos modos de falla. Los dos primeros modos están controlados por un comportamiento a corte y el modo de falla tres está controlado por la flexión

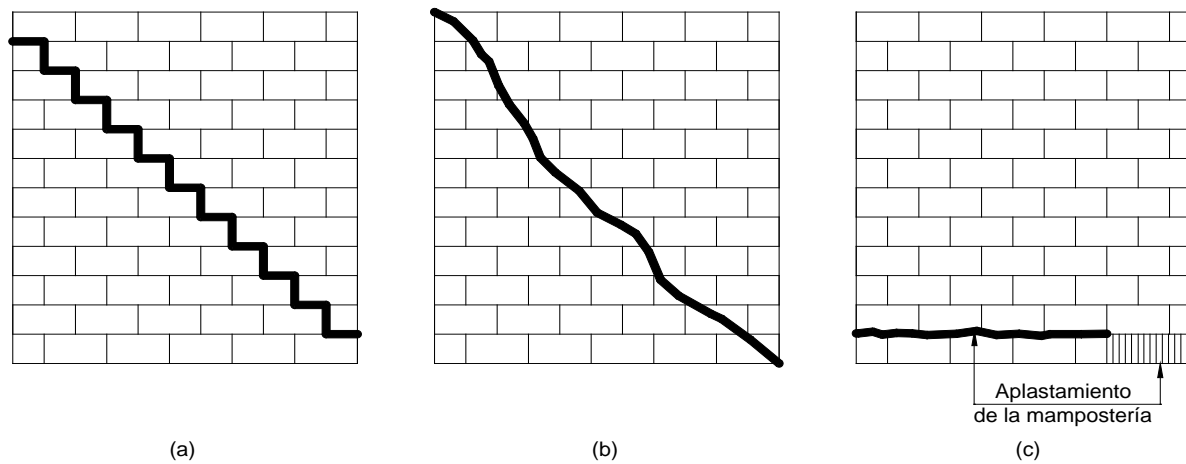


Figura 1. Modos de falla de la mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano.

(a) Deslizamiento de la junta, (b) Tensión diagonal, (c) Aplastamiento en la base.

Fuente: Tomado de la Guía ACI 440.7R-10. p. 23.

3.1.1 Resistencia al deslizamiento de la junta, V_{bjs}

$$V_{bjs} = v_{mL} A_n$$

Donde

$$v_{mL} = 0.75 \frac{0.75 v_{tL} + \frac{P_D}{A_n}}{1.5}$$

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

296400 mm²

v_{tL} = Resistencia al corte de la mampostería (No mayor a 0.70 MPa) =

0,10 MPa

P_D = Carga muerta superpuesta =

4,3 kN/m

v_{mL} =

0,056 MPa

V_{bjs} =

16474,9 N

3.1.2 Resistencia a tensión diagonal, V_{dt}

$$V_{dt} = f'_{dt} A_n \left(\frac{L}{H} \right) \sqrt{1 + \frac{f_a}{f'_{dt}}}$$

Donde

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

296400 mm²

$f'_{dt} = v_{tL} =$

0,056 MPa

L = Longitud del muro =

2,47 m

H = Altura del muro =

1,90 m

f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga muerta = $P_D/A_n =$

0,036 MPa

V_{dt} =

27517 N

3.1.3 Resistencia al aplastamiento en la base, V_{tc}

$$V_{tc} = \alpha \cdot Q_G \left(\frac{L}{H} \right) \left(1 - \frac{f_a}{0.7 f'_m} \right)$$

Donde

$\alpha =$

1,0

$f'_m =$

5,3 MPa

L = Longitud del muro =	2,47 m
H = Altura del muro =	1,90 m
f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga axial = Q_G/A_n =	0,036 MPa
V_{tc} =	13800 N

3.1.4 Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada, ϕV_n^{URM}

$$V_n^{URM} = \min(V_{bjs}, V_{dt})$$

$$V_n^{URM} =$$

16475 N

Asumiento $\phi = 0,8$

$$\phi V_n^{URM} =$$

13180 N

¡Se requiere reforzamiento por corte!

4. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

Coeficiente de reducción ambiental (Tabla 8.1 Guía ACI 440.7R - 10)

 C_E

0,85

4.1 Esfuerzo último de tensión del FRP, f_{fu}

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

Donde,

 f_{fu}^* = Esfuerzo último del FRP reportado por el fabricante

651 MPa

 f_{fu} =

553,4 MPa

4.2 Deformación última de tensión del FRP, ϵ_{fu}

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

Donde,

 ϵ_{fu}^* = Deformación última del FRP reportada por el fabricante

0,0091

 ϵ_{fu} =

0,0077

5. Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por corte

$$\epsilon_{fe} = K_v \epsilon_{fu}^* \leq C_E \epsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Donde,

 E_f = Módulo elástico de la fibra curada

62354 MPa

$$K_v = \begin{cases} 0.40 & \text{si } \omega_f \leq 0.20 \\ 0.64 - 1.2\omega_f & \text{si } 0.20 < \omega_f \leq 0.45 \\ 0.1 & \text{si } \omega_f > 0.45 \end{cases}$$

$$\omega_f = \frac{1}{85} \frac{A_f E_f}{A_n \sqrt{f'_m}}$$

 A_f = Área total de la sección transversal del FRP colocado en todo el muro

$$A_f = n t_f N$$

n = Número de capas de FRP para reforzamiento en corte	1
w_f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en corte	100 mm
N = Número de bandas de FRP para reforzamiento en corte	2
A_f =	203,2 mm ²
ω_f = Índice de refuerzo del FRP =	0,22
K_v =	0,38
ϵ_{fe} =	0,0034 ¡Ok!
f_{fe} =	214 MPa

6. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, V_f

La Figura 2 presenta la descomposición de fuerzas que resisten el corte y la flexión.

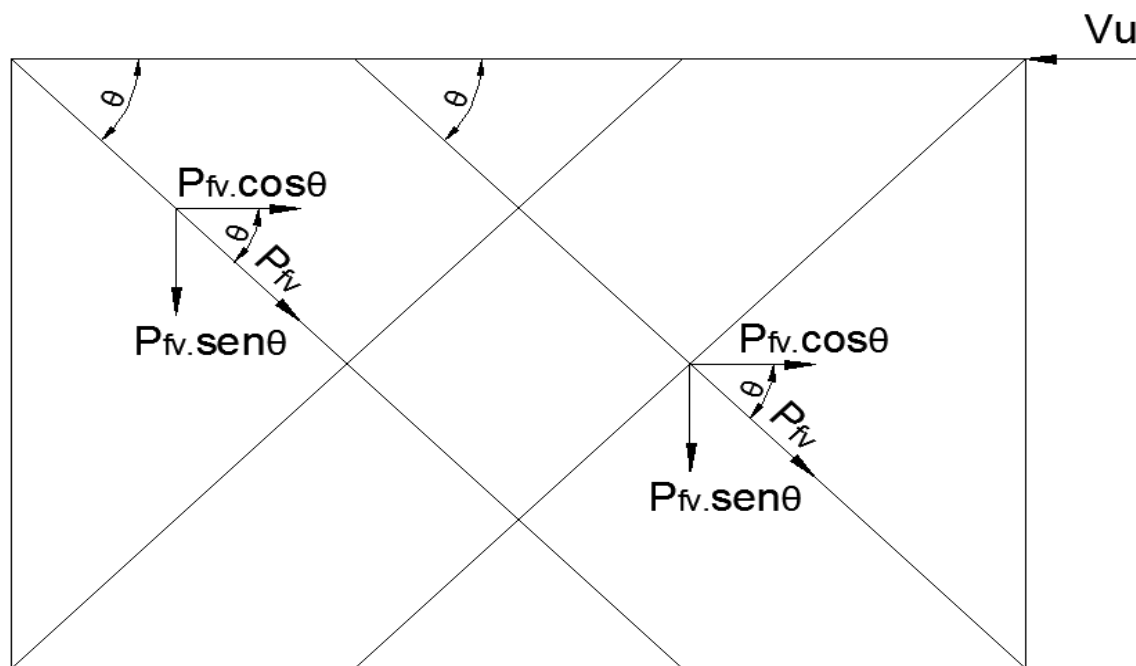


Figura 2. Descomposición de fuerzas que resisten el corte y la flexión.

La fuerza por unidad de ancho en el FRP no debe exceder lo siguiente:

$$P_{fv} = n t_f f_{fe} \leq 260 N/mm$$

P_{fv} = Fuerza por unidad de ancho en el FRP =

217,8 N/mm
¡Ok!

$$V_f = N P_{fv} w_f \cos \theta$$

θ = Ángulo de colocación del FRP (Medido respecto a la horizontal)

45 °

V_f =

30807 N

Al estar el refuerzo inclinado un ángulo θ , el valor de V_f debe ser aumentado por un factor $\sin \theta + \cos \theta$

$\sin \theta + \cos \theta$

1,41

$V_{f \text{ final}} =$

43567 N

7. Cálculo de la resistencia nominal al corte del muro con el FRP, $V_{n,s}$

$$V_{n,s} = V_n^{URM} + V_f$$

$V_{n,s} =$

60042 N

8. Cálculo de la resistencia nominal a flexión del muro con el FRP, M_n

La fuerza que resiste la flexión corresponde a la componente vertical de la fuerza P_{fv} mostrada en la Figura 2.

Número de bandas a colocar	4
n = Número de capas de FRP para reforzamiento en flexión	1
w_f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en flexión	100 mm

8.1 Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por la flexión

$$\varepsilon_{fe} = K_m \varepsilon_{fu}^* \leq C_E \varepsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Donde,

$$E_f = \text{Módulo elástico de la fibra curada} \quad 62354 \text{ MPa}$$

$$K_m = \quad 0,45$$

$$\varepsilon_{fe} = \quad 0,00410 \text{ ¡Ok!}$$

$$f_{fe} = \quad 255,3 \text{ MPa}$$

8.2 Distancia de la fibra de FRP a la fibra extrema en compresión, d_i

$$d_1 = (\text{Tomada en el centro de gravedad del reforzamiento}) \quad 1520 \text{ mm}$$

$$d_2 = (\text{Tomada en el centro de gravedad del reforzamiento}) \quad 950 \text{ mm}$$

$$\text{Profundidad del eje neutro} \quad c \quad 51,5 \text{ mm}$$

$$\text{Relación entre la profundidad del rectángulo de compresiones y el eje neutro} \quad \beta_1 \quad 0,8$$

$$\text{Profundidad del rectángulo de compresiones} \quad a \quad 41 \text{ mm}$$

8.3 Deformación en la fibra de FRP, ε_{fi}

$$\varepsilon_{f1} \quad 0,0041$$

$$\varepsilon_{f2} \quad 0,0041$$

8.4 Fuerza en la fibra de FRP, F_{fi}

$$F_{fi} = P_{fv} w_f \text{ sen } \theta = n t_f f_{fe} w_f \text{ sen } \theta$$

$$F_{f1} \quad 18344,1 \text{ N}$$

$$F_{f2} \quad 18344,1 \text{ N}$$

8.5 Verificación de c

$$C = \sum F_{fi} = \gamma \cdot f'_m \cdot a \cdot t$$

$$\gamma = \quad 0,7$$

$$t = \text{Espesor del muro} \quad 120 \text{ mm}$$

$$C = \text{Resultante del rectángulo de compresiones} = \quad 18344,1 \text{ N}$$

$$\sum F_{fi} = \quad 18344,1 \text{ N}$$

$$C - \sum F_{fi} = 0 \quad 0,0 \text{ N}$$

¡Valor de c es correcto!

8.6 Cálculo del momento, M_n

$$M_n = \sum F_i \left(d_i - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + P_u \left(\frac{L}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$M_n =$

62779 N·m

8.7 Cálculo de la máxima fuerza lateral que resiste el muro antes de que falle por flexión, $V_{n,f}$

$$V_{n,f} = \frac{M_n}{k \cdot H}$$

$k = (k = 0.5 \text{ Muro Fijo - Fijo}, k = 1.0 \text{ Muro Fijo - libre})$

$V_{n,f} =$

1,0

33042 N

Se requiere que $V_{n,f} > V_{n,s}$ para que la falla se presente primero por corte y no por flexión.

Falla por flexión

9. Cálculo de la resistencia lateral de diseño del muro con el FRP, ϕV_n

$V_n = \text{mín} (V_{n,s}, V_{n,f})$

$\phi =$

$\phi V_n =$

33042 N

0,6

19825 N

$\phi V_n > V_u$ ¡Ok!

10. Cálculo de la longitud de desarrollo, l_d

$$l_d = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{tm}}}$$

Donde,

$E_f =$ Módulo de elasticidad de la fibra curada

62354 MPa

$t_f =$ Espesor de la fibra curada

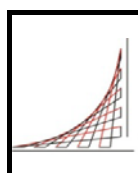
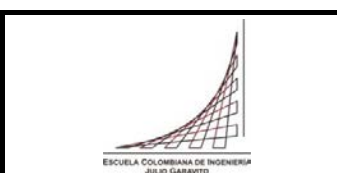
1,016 mm

$f_{tm} =$ Resistencia a la tracción de la mampostería (Puede tomarse como $10\% f'_m$) =

0,53 MPa

$l_d =$

245 mm

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP) ANEXO H: DISEÑO DEL REFORZAMIENTO - CONFIGURACIÓN EN DIAGONAL	 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>
--	--	--

1. Alcance

La metodología que presenta esta hoja de cálculo, para el diseño del reforzamiento de muros de mampostería con materiales compuestos de FRP, se hace siguiendo algunos planteamientos establecidos en el documento ACI 440. 7R - 10 (Guide for the design and construction of externally bonded Fiber Reinforced Polymer Systems for strengthening unreinforced masonry structures), ya que esta guía no considera la colocación de la fibra en forma diagonal. Sin embargo, aplicando los principios de la estática de descomposición de fuerzas se hace el respectivo diseño del reforzamiento a corte y flexión de los muros.

2. Datos de entrada

2.1 Geometría y propiedades mecánicas de la mampostería

Altura del muro	H	1,90 m
Longitud del muro	L	1,23 m
Espesor del muro	t	0,12 m
Resistencia a la compresión de la mampostería	f'_m	5,3 MPa
Deformación máxima de la mampostería	ϵ_{mu}	0,0025

2.2 Propiedades mecánicas de la fibra curada

Material de la fibra	Carbono	
Referencia de la fibra	SikaWrap®600C	
Resina de impregnación	Adhesivo epóxico	
Referencia de la resina	Sikadur® - 301	
Espesor de la fibra curada	t_f	1,016 mm
Resistencia a la tensión de la fibra curada	f_{fu}^*	651 MPa
Módulo de elasticidad de la fibra curada	E_f	62354 MPa
Elongación de rotura de la fibra curada	ϵ_{fu}^*	0,0091

2.3 Información de la carga solicitada

Peso propio muro	P_D	4,34 kN/m
Carga lateral en el plano	V_u	8 kN
Carga axial	Q_G	0,0 kN/m
Carga axial actuante	P_u	6,08 kN/m

3. Cálculo de la resistencia nominal al corte de la mampostería reforzada con FRP

3.1 Cálculo de la resistencia al corte de la mampostería no reforzada, V_n^{URM}

La guía ACI 440.7R-10 reconoce tres (3) modos de falla de muros de mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano: deslizamiento de la junta del mortero de pega, tensión diagonal y aplastamiento en la base del muro. En la Figura 1 se muestran estos modos de falla. Los dos primeros modos están controlados por un comportamiento a corte y el modo de falla tres está controlado por la flexión

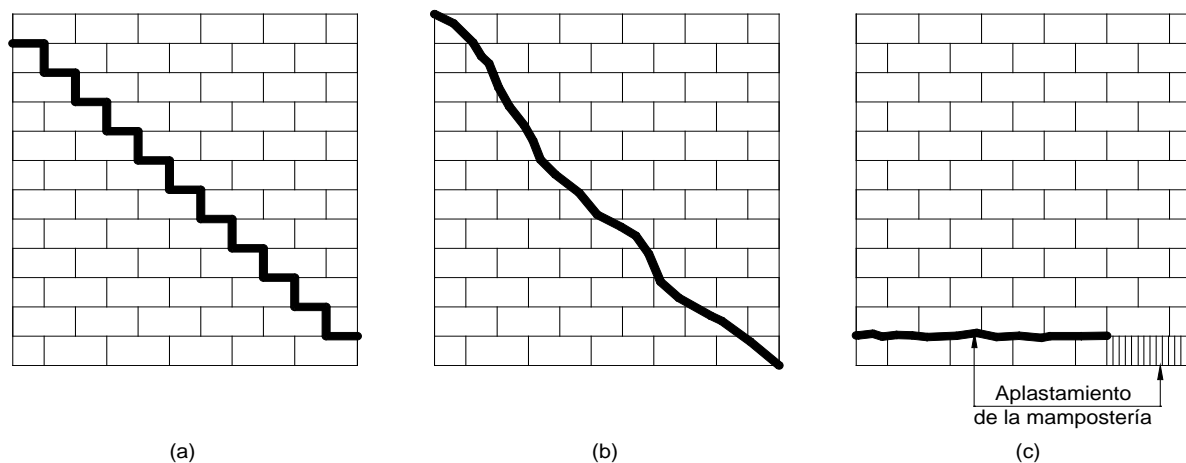


Figura 1. Modos de falla de la mampostería no reforzada sometida a cargas en su plano.

(a) Deslizamiento de la junta, (b) Tensión diagonal, (c) Aplastamiento en la base.

Fuente: Tomado de la Guía ACI 440.7R-10. p. 23.

3.1.1 Resistencia al deslizamiento de la junta, V_{bjs}

$$V_{bjs} = v_{mL} A_n$$

Donde

$$v_{mL} = 0.75 \frac{0.75 v_{tL} + \frac{P_D}{A_n}}{1.5}$$

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

147600 mm²

v_{tL} = Resistencia al corte de la mampostería (No mayor a 0.70 Mpa) =

0,10 MPa

P_D = Carga muerta superpuesta =

4,3 kN/m

v_{mL} =

0,056 MPa

V_{bjs} =

8204,1 N

3.1.2 Resistencia a tensión diagonal, V_{dt}

$$V_{dt} = f'_{dt} A_n \left(\frac{L}{H} \right) \sqrt{1 + \frac{f_a}{f'_{dt}}}$$

Donde

A_n = Área de la junta de pega que resiste el deslizamiento =

147600 mm²

$f'_{dt} = v_{tL} =$

0,056 MPa

L = Longitud del muro =

1,23 m

H = Altura del muro =

1,90 m

f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga muerta = $P_D/A_n =$

0,036 MPa

V_{dt} =

6824 N

3.1.3 Resistencia al aplastamiento en la base, V_{tc}

$$V_{tc} = \alpha \cdot Q_G \left(\frac{L}{H} \right) \left(1 - \frac{f_a}{0.7 f'_m} \right)$$

Donde

$\alpha =$

1,0

$f'_m =$

5,3 MPa

L = Longitud del muro =	1,23 m
H = Altura del muro =	1,90 m
f_a = Esfuerzo de compresión axial debido a la carga axial = Q_G/A_n =	0,036 MPa
V_{tc} =	3422 N

3.1.4 Resistencia nominal al corte de la mampostería no reforzada, ϕV_n^{URM}

$$V_n^{URM} = \min(V_{bjs}, V_{dt})$$

$$V_n^{URM} = 6824 \text{ N}$$

Asumiento $\phi = 0,8$

$$\phi V_n^{URM} = 5459 \text{ N}$$

¡Se requiere reforzamiento por corte!

4. Cálculo de las propiedades mecánicas de diseño del FRP

Coefficiente de reducción ambiental (Tabla 8.1 Guía ACI 440.7R - 10) C_E **0,85**

4.1 Esfuerzo último de tensión del FRP, f_{fu}

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

Donde,

f_{fu}^* = Esfuerzo último del FRP reportado por el fabricante 651 MPa

f_{fu} = 553,4 MPa

4.2 Deformación última de tensión del FRP, ϵ_{fu}

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$$

Donde,

ϵ_{fu}^* = Deformación última del FRP reportada por el fabricante 0,0091

ϵ_{fu} = 0,0077

5. Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por corte

$$\epsilon_{fe} = K_v \epsilon_{fu}^* \leq C_E \epsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$$

Donde,

E_f = Módulo elástico de la fibra curada 62354 MPa

$$K_v = \begin{cases} 0.40 & \text{si } \omega_f \leq 0.20 \\ 0.64 - 1.2\omega_f & \text{si } 0.20 < \omega_f \leq 0.45 \\ 0.1 & \text{si } \omega_f > 0.45 \end{cases}$$

$$\omega_f = \frac{1}{85} \frac{A_f E_f}{A_n \sqrt{f'_m}}$$

A_f = Área total de la sección transversal del FRP colocado en todo el muro

$$A_f = n t_f N$$

n = Número de capas de FRP para reforzamiento en corte	1
w_f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en corte	100 mm
N = Número de bandas de FRP para reforzamiento en corte	1
A_f =	101,6 mm ²
ω_f = Índice de refuerzo del FRP =	0,22
K_v =	0,38
ϵ_{fe} =	0,0034 ¡Ok!
f_{fe} =	214 MPa

6. Cálculo de la contribución del FRP a la resistencia al corte, V_f

La Figura 2 presenta la descomposición de fuerzas que resisten el corte y la flexión.

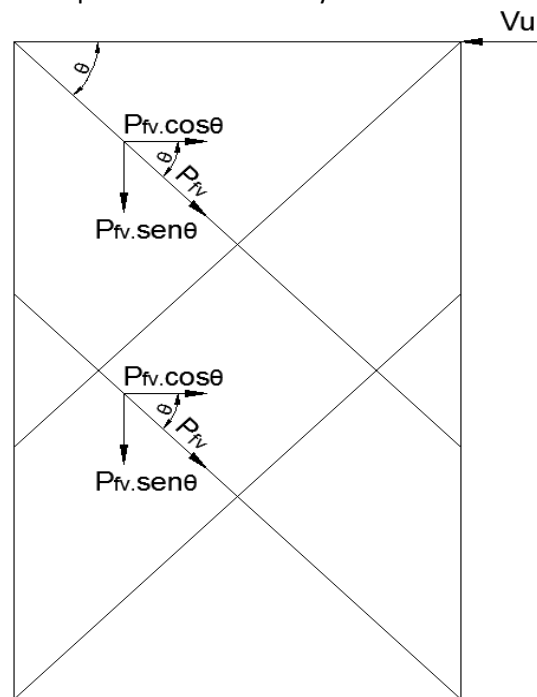


Figura 2. Descomposición de fuerzas que resisten el corte y la flexión.

La fuerza por unidad de ancho en el FRP no debe exceder lo siguiente:

$$P_{fv} = n t_f f_{fe} \leq 260 N/mm$$

P_{fv} = Fuerza por unidad de ancho en el FRP =

217,2 N/mm
¡Ok!

$$V_f = N P_{fv} w_f \cos \theta$$

θ = Ángulo de colocación del FRP (Medido respecto a la horizontal)

45 °

V_f =

15360 N

Al estar el refuerzo inclinado un ángulo θ , el valor de V_f debe ser aumentado por un factor $\sin \theta + \cos \theta$

$\sin \theta + \cos \theta$

1,41

$V_{f \text{ final}}$ =

21722 N

7. Cálculo de la resistencia nominal al corte del muro con el FRP, $V_{n,s}$

$$V_{n,s} = V_n^{URM} + V_f$$

$V_{n,s}$ =

28546 N

8. Cálculo de la resistencia nominal a flexión del muro con el FRP, M_n

La fuerza que resiste la flexión corresponde a la componente vertical de la fuerza P_{fv} mostrada en la Figura 2.

Número de bandas a colocar	4
n = Número de capas de FRP para reforzamiento en flexión	1
<i>Nota:</i> A pesar de que el muro tendrá dos tiras de refuerzo, debido a la esbeltez del mismo y la ausencia de carga axial se considera que sólo una trabajará ante la sollicitación estudiada. Si existe carga axial puede ser considerado usar las dos tiras de refuerzo.	
w_f = Ancho de la fibra de FRP para reforzamiento en flexión	100 mm

8.1 Cálculo de las propiedades mecánicas efectivas del FRP para modos de falla controlados por la flexión

$$\varepsilon_{fe} = K_m \varepsilon_{fu}^* \leq C_E \varepsilon_{fu}^*$$

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Donde,

$$E_f = \text{Módulo elástico de la fibra curada} \quad 62354 \text{ MPa}$$

$$K_m = \quad 0,45$$

$$\varepsilon_{fe} = \quad 0,00410 \text{ ¡OK!}$$

$$f_{fe} = \quad 255,3 \text{ MPa}$$

8.2 Distancia de la fibra de FRP a la fibra extrema en compresión, d_i

$$d_1 = (\text{Tomada en el centro de la luz del muro}) \quad 615 \text{ mm}$$

$$\text{Profundidad del eje neutro} \quad c \quad 51,5 \text{ mm}$$

$$\text{Relación entre la profundidad del rectángulo de compresiones y el eje neutro} \quad \beta_1 \quad 0,8$$

$$\text{Profundidad del rectángulo de compresiones} \quad a \quad 41 \text{ mm}$$

8.3 Deformación en la fibra de FRP, ε_{fi}

$$\varepsilon_{fi} \quad 0,0041$$

8.4 Fuerza en la fibra de FRP, F_{fi}

$$F_{fi} = P_{fv} w_f \text{ sen } \theta = n t_f f_{fe} w_f \text{ sen } \theta$$

$$F_{fi} \quad 18344,1 \text{ N}$$

8.5 Verificación de c

$$C = \sum F_{fi} = \gamma \cdot f'_m \cdot a \cdot t$$

$$\gamma = \quad 0,7$$

$$t = \text{Espesor del muro} \quad 120 \text{ mm}$$

$$C = \text{Resultante del rectángulo de compresiones} = \quad 18344,1 \text{ N}$$

$$\sum F_{fi} = \quad 18344,1 \text{ N}$$

$$C - \sum F_{fi} = 0 \quad 0,0 \text{ N}$$

¡Valor de c es correcto!

8.6 Cálculo del momento, M_n

$$M_n = \sum F_i \left(d_i - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + P_u \left(\frac{L}{2} - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$$M_n = \quad 26250 \text{ N}\cdot\text{m}$$

8.7 Cálculo de la máxima fuerza lateral que resiste el muro antes de que falle por flexión, $V_{n,f}$

$$V_{n,f} = \frac{M_n}{k \cdot H}$$

$k = (k = 0.5 \text{ Muro Fijo - Fijo}, k = 1.0 \text{ Muro Fijo - libre})$

$V_{n,f} =$

Se requiere que $V_{n,f} > V_{n,s}$ para que la falla se presente primero por corte y no por flexión.

1,0

13816 N

Falla por flexión

9. Cálculo de la resistencia lateral de diseño del muro con el FRP, ϕV_n

$V_n = \text{mín}(V_{n,s}, V_{n,f})$

$\phi =$

$\phi V_n =$

13816 N

0,6

8289 N

$\phi V_n > V_u$ ¡Ok!

10. Cálculo de la longitud de desarrollo, l_d

$$l_d = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{tm}}}$$

Donde,

$E_f = \text{Módulo de elasticidad de la fibra curada}$

$t_f = \text{Espesor de la fibra curada}$

$f_{tm} = \text{Resistencia a la tracción de la mampostería (Puede tomarse como } 10\% f'_m) =$

$l_d =$

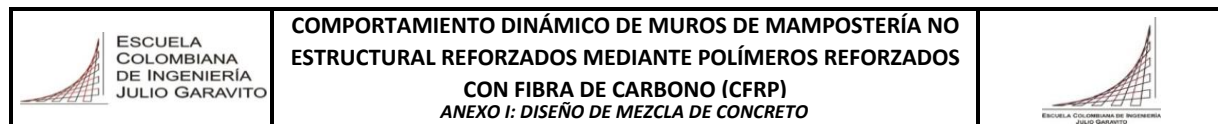
62354 MPa

1,016 mm

0,53 MPa

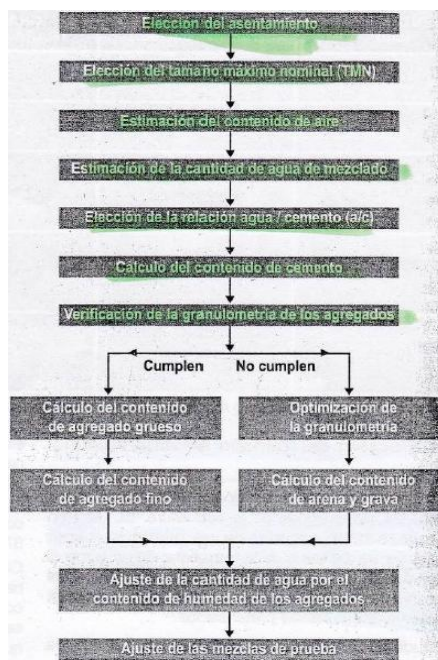
245 mm

I. Anexo: Diseño mezcla de concreto





Secuencia de pasos para la dosificación

La siguiente secuencia de pasos con la cual se realiza el diseño de la mezcla de concreto fue tomada de la metodología seguida en el capítulo 8 del libro "*Fundamentos de concreto aplicados a la construcción*" de Ricardo Matallana, ICPC.



Datos de entrada

Resistencia a la compresión del concreto	f'_c	28 MPa
Factor de seguridad:	F.S.	1.10
Resistencia a la compresión de diseño	R_{28}	30.8 MPa
Densidad de la arena SSS	ρ_{Asss}	2528 kg/m ³
Humedad de la arena	H_A	6.3 %
Absorción de la arena	h_A	2.0 %
Densidad de la grava SSS	ρ_{Gsss}	2503 kg/m ³
Humedad de la grava	H_G	2.5 %
Absorción de la grava	h_G	3.4 %
Densidad del agua	ρ_a	1000 kg/m ³
Densidad del cemento	ρ_c	2950 kg/m ³

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP) ANEXO I: DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO	 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
---	--	---

1. Elección del asentamiento

ASENTAMIENTO (cm)	CONSISTENCIA (Tipo de concreto)	GRADO DE TRABAJABILIDAD	TIPO DE ESTRUCTURA
0 - 2	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de formaleta
2 - 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados y contruidos con extrusoras
3,5 - 5	Semi-seca	Pequeño	Construcciones masivas. Losas medianamente reforzadas. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales
5 - 10	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas. Losas y pavimentos compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros con vibración
10 - 15	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. Recomendable para sitios de difícil compactación.

Tabla 8.1 Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de estructuras.

Asentamiento

7.5 cm

2. Elección del Tamaño máximo nominal (TMN) y el tamaño máximo (TM)

TMN

3/4 pulg

TM

1 pulg



3. Estimación contenido de aire

AGREGADO GRUESO		PROMEDIO APROXIMADO DE AIRE ATRAPADO (%)	PROMEDIO TOTAL DE AIRE RECOMENDADO PARA LOS SIGUIENTES GRADOS DE EXPOSICIÓN (%)		
Pulgadas	mm		Suave	Moderado	Severo
3/8	9,5	2,7	4,5	6,0	7,5
1/2	12,5	2,5	4,0	5,5	7,0
3/4	19	2,0	3,5	5,0	6,0
1	25	1,7	3,0	4,5	6,0
1 1/2	37,5	1,5	2,5	4,5	5,5
2	50	1,0	2,0	4,0	4,0
3	75	0,3	1,5	3,5	4,5
6	150	0,2	1,0	3,0	4,0

Tabla 8.2. Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición. (8.8)

Contenido de aire

2%

 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP)</p> <p>ANEXO I: DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO</p>	 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>
--	---	--

4. Estimación de la cantidad de agua, a.

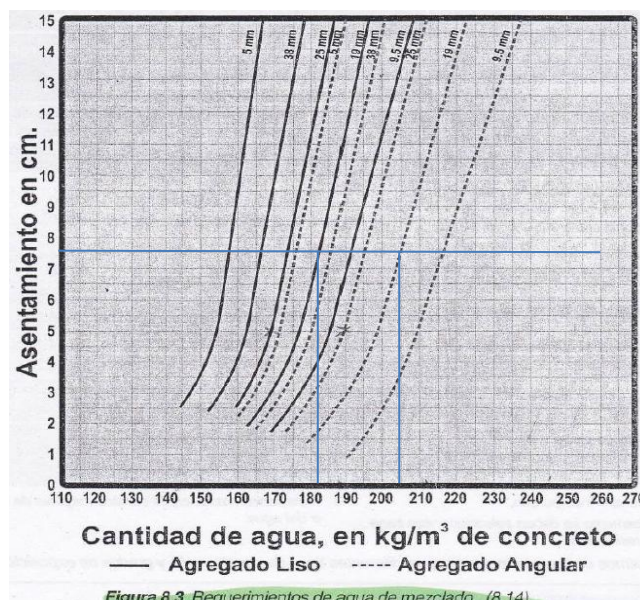


Figura 8.3 Requerimientos de agua de mezclado. (8.14)

CONTENIDO DE AIRE	ASENTAMIENTO (cm)	AGUA EN kg/m³ DE CONCRETO PARA LOS TMN DEL AGREGADO INDICADOS							
		9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	—
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido, por ciento.	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
CONCRETO CON AIRE INCLUIDO	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	—
	Promedio recomendable de contenido total de aire, por ciento.	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

* Las cantidades de agua de mezclado mostradas pueden utilizarse en los cálculos de los factores de relación agua - cemento para mezclas de prueba. Son las máximas para agregados gruesos angulares, razonablemente bien gradados dentro de los límites de las especificaciones aceptadas.

** Los valores de asentamiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40 mm, están basados en ensayos de asentamiento efectuados después de remover las partículas mayores de 40 mm por medio de tamizado en estado fresco.

Tabla 8.3. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire, para diferentes asentamientos y TMN del agregado (8.13)

Agregado liso* (Ver Fig. 8.3)

183 kg/m³

Agregado angular* (Ver Fig. 8.3)

205 kg/m³



Según Tabla 8.3

200 kg/m³

Cantidad de agua =

196 kg/m³

* Los tamaños del agregado son para el máximo nominal (TMN)

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO	COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP) ANEXO I: DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO	 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
---	--	---

5. Elección de la relación a/c

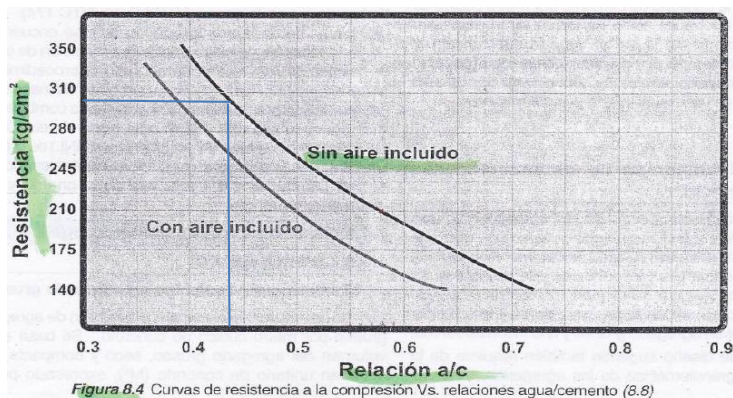


Figura 8.4 Curvas de resistencia a la compresión Vs. relaciones agua/cemento (8.8)

x = Relación agua cemento (a/c)

$$x = \frac{\ln(124,1) - \ln(R_{28})}{\ln(20)}$$

x = a/c =

a/c según Fig. 8.4

a/c

0.47

0.44

0.45

6. Cálculo de la cantidad de cemento, c

$$c = a/a/c$$

Cantidad de cemento =

435.6 kg/m³



7. Cálculo del volumen de agregados

Material	Peso (kg/m ³)		Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Agua	196		1000	0.196
Aire	-		-	0.02
Cemento	435.6		2950	0.15
Agregados	-		-	0.64

Vol agregados = 1,0 - Vol (agua, aire, cemento)

V_{ag}

0.64 m³

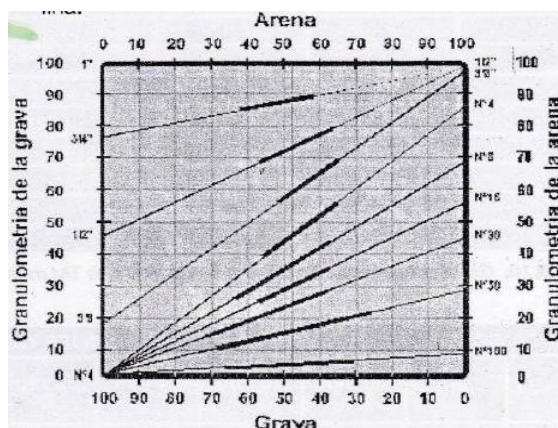
 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>	<p>COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA NO ESTRUCTURAL REFORZADOS MEDIANTE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO (CFRP)</p> <p>ANEXO I: DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO</p>	 <p>ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO</p>
--	---	--

8. Optimización de granulometría

Se utiliza el método de la Road Note Laboratory (RNL)

TAMIZ		LÍMITES DE LOS PORCENTAJES QUE PASAN LOS SIGUIENTES TAMAÑOS MÁXIMOS									
Pulgada	mm	90 mm 3 5/8"	75 mm 3"	64 mm 2 1/2"	50 mm 2"	37.5 mm 1 1/2"	25 mm 1"	19 mm 3/4"	12.7 mm 1/2"	9.5 mm 3/8"	
3 1/2	90,5	100									
3	75	94-91	100								
2 1/2	64	89-83	94-91	100							
2	50	82-73	87-80	92-88	100						
1 1/2	37,5	74-62	78-68	83-75	90-85	100					
1	25	64-50	68-55	72-60	78-68	87-80	100				
3/4	19	58-42	62-47	65-51	71-58	78-68	90-85	100			
1/2	12,5	50-34	53-37	57-41	62-47	68-55	78-68	87-80	100		
3/8	9,5	45-29	48-32	51-35	56-40	62-47	71-58	78-68	90-85	100	
No. 4	4,75	36-20	38-22	40-24	44-27	48-32	56-40	62-47	71-58	78-68	
No. 8	2,36	28-13	30-15	32-16	34-18	38-22	44-27	48-32	55-40	61-46	
No. 16	1,18	22-9	23-10	25-11	27-13	30-15	34-18	38-22	44-27	48-32	
No. 30	600 µm	17-6	18-7	20-8	21-9	23-10	27-13	30-15	34-19	38-22	
No. 50	300 µm	14-4	14-4	15-5	17-8	28-7	21-9	23-10	27-13	30-15	
No. 100	150 µm	11-3	11-3	12-4	13-4	14-5	17-6	18-7	21-9	23-10	

Tabla 8.11 Rangos granulométricos recomendados (8.11)

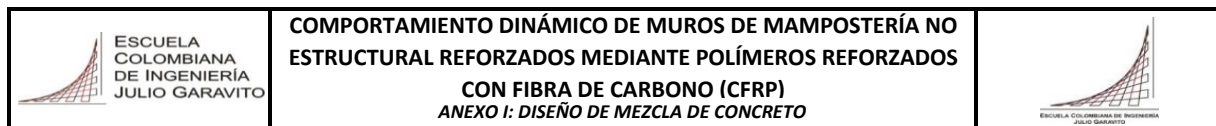


% Arena = %A 47.5%
 % Grava = %G 52.5%

9. Cálculo cantidades de agregados

$$\rho_{prom} = \frac{\rho_{Gss} \times \rho_{Ass}}{\%A * \rho_{Gss} + \%G \rho_{Ass}}$$

$\rho_{prom} =$	2515 kg/m ³
Peso de agregados	1600 kg/m ³
Cantidad de arena =	760.1 kg/m³
Cantidad de grava =	840.1 kg/m³



10. Corrección de la cantidad de arena y agua

Los cálculos realizados anteriormente se realizan con la arena en un estado SSS (Saturado Superficialmente Seco). Como en la mayoría de las ocasiones a la hora de realizar la mezcla, la arena y la grava no se encuentra en esta condición, se deben realizar estas correcciones de la cantidad de arena, grava y agua, a partir de la humedad que tenga la arena y la grava.

Arena corregida, A_{corr}

$$A_{corr} = A \left(\frac{100 + H_A}{100 + h_A} \right)$$

A = Arena sin corregir, calculada en 9.

Arena Corregida =

792.0 kg/m³

Grava corregida, G_{corr}

$$G_{corr} = G \left(\frac{100 + H_G}{100 + h_G} \right)$$

G = Grava sin corregir, calculada en 9.

Grava Corregida =

832.8 kg/m³

Agua corregida, a_{corr}

$$a_{corr} = a - (A + G) \left[\frac{\%A(H_A - h_A)}{100 + h_A} + \frac{\%G(H_G - h_G)}{100 + h_G} \right]$$

A = Arena sin corregir, calculada en 9.

G = Grava sin corregir, calculada en 9.

a = agua sin corregir, calculada en 4.

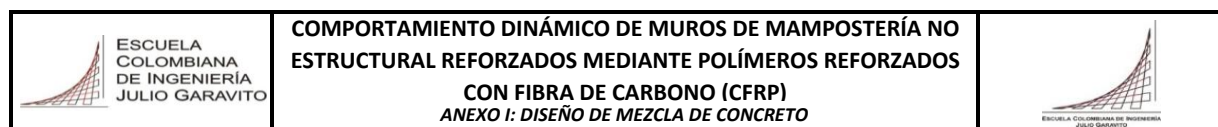
Agua corregida =

171.4 kg/m³

11. Resumen del diseño

Los cálculos realizados corresponden a un volumen de mezcla de 1 m³.

Cantidad de cemento =	c	435.6 kg/m ³
Cantidad de arena =	A	792.0 kg/m ³
Cantidad de grava =	G	832.8 kg/m ³
Cantidad de agua =	a	171.4 kg/m ³



12. Cálculo de las proporciones de la mezcla requerida

Volumen de mezcla requerida	V	0.0993 m ³
Factor de desperdicio	F.D.	15%
Volumen final de mezcla	V _f	0.1142 m ³
Cantidad de cemento =	c	49.8 kg
Cantidad de arena =	a	90.5 kg
Cantidad de grava =	G	95.1 kg
Cantidad de agua =	A	19.6 kg

13. Ensayo de Asentamiento

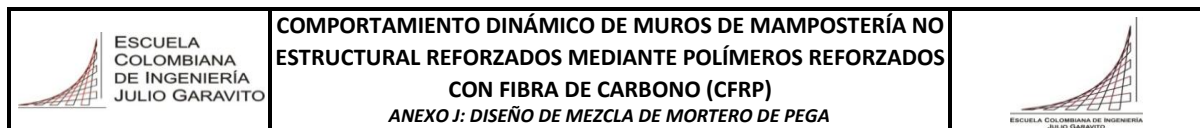
Ensayo asentamiento 7 cm

Asentamiento	Tolerancia
51 mm o menos	13 mm
51 mm a 102 mm	25 mm
Mayor que 102 mm	38 mm

¿Cumple Asentamiento?

SI/NO

J. Anexo: Diseño mezcla de mortero de pega



1. Datos de entrada

Tipo de mortero:		M
Resistencia a la compresión del tipo de mortero	f'cp:	17.5 MPa
% Fluidez:	Mín	115 %
	Máx	125 %
Factor de seguridad:	F.S.	1.00
Resistencia a la compresión de diseño	R ₂₈ :	17.50 MPa
Densidad de la arena en estado SSS	ρ _{asss}	2618 kg/m ³
Densidad del agua	ρ _A	1000 kg/m ³
Densidad del cemento	ρ _c	2950 kg/m ³
Humedad de la arena	Ha	8.3 %
Absorción de la arena	ha	1.1 %
Constante de consistencia	K	1.3

2. Cálculo de la relación a/c

x = Relación agua cemento (a/c)

$$x = \frac{\ln(124,1) - \ln(R_{28})}{\ln(20)}$$

x = a/c =

x = a/c =

0.654

0.65

3. Cálculo de la relación cemento-arena, n

$$n = \frac{\frac{x}{K} - 0,26}{0,12}$$

n =

n =

2.00

2.0

4. Cálculo de la cantidad de cemento, c

$$c = \frac{1}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{K(0,26 + 0,12n)}{\rho_A} + \frac{n}{\rho_{asss}}} \quad (\text{kg/m}^3 \text{ de mezcla})$$

c =

c =

570.475 kg/m³

570.5 kg/m³

5. Cálculo de la cantidad de agua, A

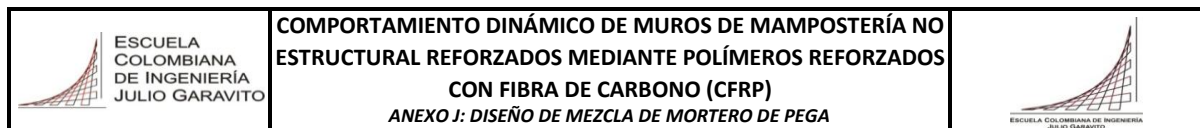
$$A = K(0,26c + 0,12nc) \quad (\text{kg/m}^3 \text{ de mezcla})$$

A =

A =

370.825 kg/m³

370.8 kg/m³



6. Cálculo de la cantidad de arena, a

$$a = nc \quad (\text{kg/m}^3 \text{ de mezcla})$$

$$a =$$

$$\mathbf{a =}$$

$$1141.000 \text{ kg/m}^3$$

$$\mathbf{1141.0 \text{ kg/m}^3}$$

7. Corrección de la cantidad de arena y agua

Los cálculos realizados anteriormente se realizan con la arena en un estado SSS (Saturado Superficialmente Seco). Como en la mayoría de las ocasiones a la hora de realizar la mezcla, la arena no se encuentra en esta condición, se deben realizar estas correcciones de la cantidad de arena y agua, a partir de la humedad que tenga la arena.

Arena corregida, a_{corr}

$$a_{corr} = a \left(\frac{100 + H_a}{100 + h_a} \right) \quad a = \text{arena sin corregir, calculada en 6.}$$

$$a_{corr} =$$

$$\mathbf{a_{corr} =}$$

$$1221.790 \text{ kg/m}^3$$

$$\mathbf{1221.8 \text{ kg/m}^3}$$

Agua corregida, A_{corr}

$$A_{corr} = A - a \left(\frac{H_a - h_a}{100 + h_a} \right) \quad a = \text{arena sin corregir, calculada en 6.}$$

$$A = \text{agua sin corregir, calculada en 5.}$$

$$A_{corr} =$$

$$\mathbf{A_{corr} =}$$

$$290.010 \text{ kg/m}^3$$

$$\mathbf{290.0 \text{ kg/m}^3}$$

8. Resumen del diseño

Los cálculos realizados corresponden a un volumen de mezcla de 1 m^3 .

Cantidad de cemento = **c** **570.5 kg/m³**

Cantidad de arena = **a** **1221.8 kg/m³**

Cantidad de agua = **A** **290.0 kg/m³**

9. Cálculo de las proporciones de la mezcla requerida

Volumen de mezcla requerida **V** **0.00075 m³**

Factor de desperdicio **F.D.** **30%**

Volumen final de mezcla **V_f** **0.000975 m³**

Cantidad de cemento = **c** **0.556 kg**

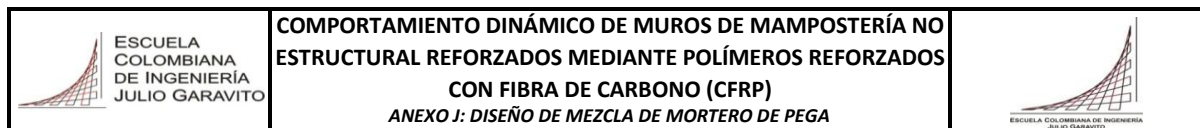
Cantidad de arena = **a** **1.191 kg**

Cantidad de agua = **A** **0.283 kg**

Cantidad de cemento = **c** **556.2 g**

Cantidad de arena = **a** **1191.3 g**

Cantidad de agua = **A** **282.8 g**



10. Cálculo de la fluidez de la mezcla de mortero

$\%Fluidez = \frac{D_{prom} - D_m}{D_m} * 100$	Dprom = Diámetro promedio Dm = Diámetro del molde =	100 mm
D ₁ =		204 mm
D ₂ =		225 mm
D ₃ =		214 mm
D ₄ =		225 mm
D _{prom} =		217 mm
% Fluidez =		117 %
¿Cumple Fluidez?		¡SI!

K. Anexo: Propiedades del tejido de fibra de carbono y adhesivo epóxico

HOJA TECNICA DE PRODUCTO

SikaWrap 600C

TEJIDO DE FIBRA DE CARBONO PARA REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL
(EQUIVALENTE AL SIKAWRAP-103C)

DESCRIPCION

El **SikaWrap 600C** es un tejido de fibras de carbono unidireccionales, de alta resistencia y alto módulo. El material es saturado en obra usando el sistema epóxico **Sikadur 301** para conformar un sistema de polímero reforzado con fibras de carbono, usado para el reforzamiento de elementos estructurales.

USOS

Para el reforzamiento a flexión, cortante, confinamiento de elementos estructurales tales como vigas, columnas, losas, muros por las siguientes causas:

Incremento de cargas

- Incremento de carga viva en bodegas
- Incremento de volumen de tráfico en puentes
- Instalación de maquinaria pesada en edificios industriales
- Estructuras con vibración
- Cambios en el uso de edificios

Reforzamiento Sísmico

- Envoltura de columnas (confinamiento)
- Paredes de mampostería no reforzada

Daño de partes estructurales

- Envejecimiento de materiales de construcción (corrosión)
- Impacto de vehículos y fuego

Cambio en el sistema estructural

- Remoción de secciones de losa y muros para aberturas de acceso.

Defectos de diseño o construcción

- Refuerzo insuficiente
- Altura insuficiente de los elementos

VENTAJAS

- Es flexible, puede colocarse envolviendo elementos de forma compleja
- Alta resistencia y bajo peso
- No se corroe
- Resistente a sustancias alcalinas y ácidos
- Bajo impacto estético

MODO DE EMPLEO

Preparación de la superficie

La superficie debe estar limpia y sana. Puede estar seca o húmeda, pero libre de agua empozada o hielo. Remover polvo, lechada, grasa, compuestos curadores, impregnaciones, grasas, partículas extrañas, material suelto o cualquier otro elemento que impida la adherencia. Cuando la superficie sea irregular debe ser nivelada con un mortero de reparación adecuado. La resistencia en adherencia del concreto debe ser verificada, después de la preparación de superficie por un ensayo aleatorio de resistencia de adherencia a tensión (ACI 503R) a criterio del ingeniero. La mínima resistencia a tensión debe ser de 15 kg/cm² con falla del concreto.

Método de limpieza

Para la preparación de la superficie de concreto se recomienda utilizar chorro de

arena o cualquier otro procedimiento de limpieza mecánica aprobado, que provea textura rugosa a la superficie.

Mezclado del epóxico

Para información sobre características y mezclado del **Sikadur 301** referirse a la hoja técnica de los productos.

El consumo de la resina epóxica **Sikadur 301**, depende de la rugosidad de la superficie y la práctica que se tenga en el procedimiento de impregnación del tejido, sin embargo el consumo teórico aproximado es de 350 g/m² de producto para la imprimación de la superficie del sustrato y 850 g/m² para la saturación o impregnación del tejido, aproximadamente.

Aplicación

Antes de la colocación del tejido, la superficie de concreto debe ser imprimada y sellada usando el epóxico **Sikadur 301**. En cualquier caso, la instalación debe ser realizada por un aplicador autorizado o personal calificado.

Corte del tejido

El tejido puede ser cortado a la longitud apropiada usando tijeras de tipo industrial o para trabajo pesado. Debe evitarse el uso de cualquier elemento de corte sin filo que pueda debilitar o deshilar la fibra.

DATOS TECNICOS

Propiedades de la fibra	
Resistencia a tensión	4.200 N/mm ²
Módulo de tensión	240.000 N/mm ²
Elongación	1,55 %
Dirección de la fibra	0° (unidireccional)
Peso por m ²	610 g
Espesor	0,34 mm

PRECAUCIONES

Los cálculos de diseño deben ser realizados por un ingeniero independiente, debidamente acreditado, siguiendo los lineamientos de estándares de diseño tales como: ACI 440-2R y FIB 14. El sistema es barrera de vapor. No se debe encapsular elementos de concreto en zonas donde se presente ciclo de hielo-deshielo. Para mayor detalle sobre la instalación y requerimientos de control de calidad referirse a las Especificaciones Generales para la instalación del Sistema **SikaWrap**. Consultar al Departamento Técnico.

MEDIDAS DE SEGURIDAD

Manténgase fuera del alcance de los niños. Los tejidos **SikaWrap** no son reactivos. Sin embargo, debe tenerse precaución con el polvo de carbón de la superficie, cuando se manipule el producto. Deben utilizarse guantes para evitar irritación de la piel. Igualmente se debe proteger del polvo de carbono que se disperse en el aire durante el proceso de cortado. Es recomendable utilizar máscaras de protección adecuadas para este caso.

PRESENTACION

Rollos de 25 m² / (0,50 m x 50 m)

ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

Se debe proteger el material de posible ataque mecánico o contaminación, por tal razón se debe almacenar en su empaque bien cerrado. Transportar con las precauciones normales para productos delicados.

CODIGOS R/S

R: 22/43 S: 2/24/25/37



Responsabilidad Integral



ISO 9001

Icontec

Código: CO-SC 033-1



ISO 14001

Icontec

Código: CO-SA 008-1

Sika Colombia S.A.

Vereda Canavita, km 20.5
Autopista Norte, Tocancipá
Conmutador: 878 6333
Colombia - web:col.sika.com

NOTA

La información, y en particular las recomendaciones relacionadas con la aplicación y uso final de los productos **Sika**, se proporcionan de buena fe, con base en el conocimiento y la experiencia actuales de **Sika** sobre los productos que han sido apropiadamente almacenados, manipulados y aplicados bajo condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de **Sika**. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de las obras son tales, que ninguna garantía con respecto a la comercialidad o aptitud para un propósito particular, ni responsabilidad proveniente de cualquier tipo de relación legal pueden ser inferidos ya sea de esta información o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otra asesoría ofrecida. El usuario del producto debe probar la idoneidad del mismo para la aplicación y propósitos deseados. **Sika** se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todas las órdenes de compra son aceptadas con sujeción a nuestros términos de venta y despacho publicadas en la página web: col.sika.com. Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada.

Hoja Técnica de Producto

SikaWrap Hex 600C

Versión: 01/2015

HOJA TECNICA DE PRODUCTO

Sikadur®-301

RESINA DE IMPREGNACIÓN DE ALTO MÓDULO Y ALTA RESISTENCIA

DESCRIPCIÓN	Sikadur 301 es un adhesivo epóxico de 2 componentes, 100% sólidos, de alto módulo, alta resistencia y resistente a la humedad.
USOS	Como resina de impregnación de los tejidos SikaWrap para reforzamiento estructural.
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de mezclar. • Resistente a la humedad antes, durante y después del curado. • Adhesivo de alta resistencia y alto módulo. • Excelente adhesión al concreto, mampostería, metales, madera y la mayoría de materiales de construcción. • Totalmente compatible y desarrollado específicamente para los sistemas SikaWrap. • Alta resistencia a la deformación bajo carga sostenida. • Alta resistencia a la abrasión y los impactos. • Libre de solventes. <p>Rendimiento: Como sellante del concreto: Aprox. 0.35 kg/m². Como resina de impregnación de la tela: Aprox. 0.65 - 0.85 kg/m² dependiendo del tipo de SikaWrap.</p>

MODO DE EMPLEO

Preparación de la superficie:

La superficie del concreto debe prepararse como mínimo con un perfil de superficie (CSP 3) tal como lo define el ICRI. Los desniveles de la superficie no deben exceder de 1/32 in. (1 mm). El sustrato debe estar limpio, sano, y libre de humedad. Remover por medios mecánicos el polvo, residuos de lechada, grasa, aceite, agentes curadores, impregnaciones, partículas extrañas, recubrimientos y materiales sueltos. Para mejores resultados, el sustrato debe estar seco. Sin embargo, una superficie ligeramente húmeda es aceptable.

Mezclado:

Premezclar el componente A, El componente B no requiere mezclado. Mezcle la unidad completa, no divida las unidades. Vierta el componente B en el A. Mezcle totalmente durante 5 minutos usando un mezclador mecánico de bajas revoluciones (400-600 rpm) hasta que la mezcla sea uniforme.

Aplicación como sellador superficial:

aplique el **Sikadur 301** mezclado sobre la superficie usando una brocha o rodillo. Debe saturarse completamente la superficie con el **Sikadur 301**. El grado de cubrimiento depende de la porosidad de la superficie.

Como resina de impregnación:

Sature el tejido **SikaWrap** hasta que las fibras queden totalmente húmedas. Para instalaciones verticales y sobre cabeza, puede usarse el **Sikadur 330** para imprimir el sustrato antes de la colocación del tejido. El **Sikadur 301** puede aplicarse tanto en sistema seco como en sistema húmedo. Consulte las hojas técnicas de los tejidos **SikaWrap** para más información. Si es usado como una resina de impregnación en el sistema húmedo, el **Sikadur 301** debe

aplicarse manualmente con brocha o rodillo sobre ambas caras del tejido **SikaWrap**. Luego de saturado, se debe quitar el exceso de resina usando una espátula de goma. Debido a la viscosidad del **Sikadur 301**, no debe usarse un saturador mecánico. Si se desea hacerlo, consulte las hojas técnicas de las resinas de impregnación apropiadas (ej. **Sikadur 300** o **Sikadur Hex 300**).

DATOS TÉCNICOS

(a 23°C y 50% H.R.)	
Color:	Gris claro.
Relación de mezcla:	Componente 'A': Componente 'B' = 3:1 en volumen.
Viscosidad (mezclado):	Aprox. 2,700 cps.
Vida en el recipiente:	Aprox. 40 minutos (1 galón).
Tiempo de contacto:	Aprox. 90 minutos.
Temperatura de deflexión (HDT) (ASTM D-648) 7 días:	47°C.
Temperatura de transición vítrea (Tg) 7 días:	49°C.
Propiedades mecánicas:	
Propiedades de tensión (ASTM D-638):	
Resistencia a tensión a 7 días:	8,000 psi (52.0 MPa).
Módulo de elasticidad:	290 ksi (2,000 MPa).
Elongación de rotura:	3.5%.
Propiedades de flexión (ASTM D-790):	
Resistencia a flexión a 7 días:	13,000 psi (90.0 MPa).
Módulo tangente:	500 ksi (3,448 MPa).
Deformación unitaria de fluencia:	3.0%.
Propiedades de compresión (ASTM D-695):	
Resistencia a la compresión:	1 día: 4,000 psi (27.6 MPa). 3 días: 11,900 psi (82.1 MPa). 7 días: 13,900 psi (96.0 MPa)
Módulo de compresión:	250 ksi (1,725 MPa).

PRECAUCIONES

Limitaciones

- Temperatura mínima del sustrato y ambiente 40°F (4°C). Temperatura máxima del sustrato y ambiente 95°F (35°C).
- No diluya con solventes.
- Es barrera de vapor una vez cura.
- La edad mínima del concreto debe ser 21-28 días dependiendo del curado y las condiciones de secado.
- A bajas temperaturas y/o alta humedad relativa, se puede formar un leve residuo grasoso sobre la superficie del **Sikadur 301**. Este residuo se debe remover si se quiere aplicar otra capa de tejido **SikaWrap** sobre el **Sikadur 301** ya curado. Debe retirarse este residuo para asegurar una adecuada adherencia. El residuo se puede remover con un trapo mojado con solvente o con agua y detergente. En ambos casos, la superficie debe limpiarse con un trapo seco antes de la colocación de la siguiente capa de tejido o recubrimiento.

MEDIDAS DE SEGURIDAD

Peligro: Componente 'A' - IRRITANTE, SENSIBILIZADOR - Contiene Resina Epóxi-ca, y una mezcla de Hidrocarbano Aromatico, Sílice Amorfo, y Dioxido de Titanio. Irritante a los ojos. Puede causar irritaciones respiratorias y de piel. Contacto prolongado o repetido con la piel puede causar reacción alérgica. Una deliberada concentración de vapores que pueden inhalarse es peligroso y puede ser fatal. Evite el contacto con los ojos y piel. Es dañino si se ingiere. Usese solo con adecuada ventilación. Se recomienda usar gafas de seguridad y guantes resistentes a los químicos. Si no hay adecuada ventilación use un respirador aprobado. Quite las ropas contaminadas y lávelas antes de volver a usarlas.

Componente 'B' - CORROSIVO, SENSIBILIZADOR, IRRITANTE - Contiene Aminas. El contacto con la piel y ojos causa quemaduras graves. Causa irritación de ojos y piel. Los vapores pueden causar irritación de la respiración.

Contacto prolongado y/o repetido puede causar una reacción alérgica. Es dañino si se ingiere. Evite el contacto con la piel y ojos. Use solo con adecuada ventilación. Se recomienda usar gafas de seguridad y guantes re-sistentes a los químicos. Si no hay adecuada ventilación use un respirador aprobado. Quite las ropas contaminadas y lávelas antes de volver a usarlas.

Primeros auxilios de los ojos:

Sostenga los párpados lávese con abundante agua durante 15 minutos.

Piel: Quite la ropa contaminada. Lávese con agua y jabón durante 15 minutos.

Inhalación: Lleve la persona a un sitio con aire fresco.

Ingestión: No induzca el vómito.

En todos los casos contacte a un médico si los síntomas persisten.

Manténgase fuera del alcance de los niños.

PRESENTACIÓN

Unidad de 4 kg

ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE

El tiempo de almacenamiento es de 2 años en su envase original, bien cerrado en lugar fresco y bajo techo. Transportar con las precauciones normales para productos químicos.

CODIGOS R/S

R: 20/21/22/34/36/38/43/51/53

S: 2/3/7/9/13/15/20/21/23/24/25/26/27/29/36/38/39/41/45/46



Responsabilidad Integral



ISO 9001

Icontec

Código: CO-SC 033-1



ISO 14001

Icontec

Código: CO-SA 008-1

Sika Colombia S.A.

Vereda Canavita, km 20.5

Autopista Norte, Tocancipá

Conmutador: 878 6333

Colombia - web:col.sika.com

NOTA

La información, y en particular las recomendaciones relacionadas con la aplicación y uso final de los productos **Sika**, se proporcionan de buena fe, con base en el conocimiento y la experiencia actuales de **Sika** sobre los productos que han sido apropiadamente almacenados, manipulados y aplicados bajo condiciones normales de acuerdo con las recomendaciones de **Sika**. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones actuales de las obras son tales, que ninguna garantía con respecto a la comercialidad o aptitud para un propósito particular, ni responsabilidad proveniente de cualquier tipo de relación legal pueden ser inferidos ya sea de esta información o de cualquier recomendación escrita o de cualquier otra asesoría ofrecida. El usuario del producto debe probar la idoneidad del mismo para la aplicación y propósitos deseados. **Sika** se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todas las órdenes de compra son aceptadas con sujeción a nuestros términos de venta y despacho publicadas en la página web: col.sika.com. Los usuarios deben referirse siempre a la versión local más reciente de la Hoja Técnica del Producto cuya copia será suministrada al ser solicitada.

Hoja Técnica de Producto

Sikadur 301

Versión: 01/2015



Bibliografía

- ACI Committee 440, & American Concrete Institute. (2010). *Guide for the design and Construction of externally bonded fiber-reinforced polymer systems for strengthening unreinforced masonry structures*. (7 ed.). Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, & Fondo de prevención y atención de emergencias. (2010). *Visita técnica comisión de dirección de prevención y atención de emergencias – FOPAE – San Pedro de la Paz – Concepción – Chile* (pp. 58). Bogotá D.C.
- Alcocer, S. (2003). *Rehabilitación de estructuras de mampostería Edificaciones de mampostería para vivienda* (3 ed., pp. 106). Ciudad de México: Fundación ICA.
- Alcocer, S. M., Ruiz, J., Pineda, J. A., & Zepeda, J. A. (1996). *Retrofitting of Confined Masonry Walls with Welded Wire Mesh*. Paper presented at the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, & Fondo Para la Reconstrucción y Desarrollo Social del Eje Cafetero-Forec. (2001). *Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sismo resistente de viviendas de mampostería*. Bogotá D.C.
- Bastidas, E., Molina, L., Yamin, L., Sarria, A., Ortega, J., & Tumialán, G. Non – Structural masonry walls strengthened with GFRP laminate. (pp. 12). Bogotá D.C.: Universidad De Los Andes.
- Capozzuca, R. (2011). Experimental analysis of historic masonry walls reinforced by CFRP under in-plane cyclic loading. *Composite Structures* 94(1), 277-289.
- Centro de Estudios e Investigaciones Sobre Riesgo. (2005). *Escenarios de riesgo y pérdidas por terremoto para Bogotá*. Bogotá: Universidad De Los Andes.
- Dizhur, D., Griffith, M., & Ingham, J. (2014). Out-of-plane strengthening of unreinforced masonry walls using near surface mounted fibre reinforced polymer strips. *Engineering Structures*, 59, 330-343.
- Ehsani, M. R., & Saadatmanesh, H. (1996). Seismic Retrofitting of URM Walls with Fiber Composites. *Masonry Society*, 14(2), 63-72.
- Elgawady, M., Lestuzzi, P., & Bardoux, M. (2006). Aseismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP. *Composites Part B: engineering*, 37(2-3), 148-162.
- Federal Emergency Management Agency. (2007). *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components (FEMA 461)* Washington, D.C.
- Galati, N., Tumialán, G., & Nanni, A. (2006). Strengthening with FRP bars of URM walls subject to out-of-plane loads. *Construction and Building Materials*, 20(1-2), 101-110.
- Gilstrap, J., & Dolan, C. (1998). Out-of-Plane Bending of FRP-Reinforced Masonry Walls. *Composites Science and Technology*, 58, 1277-1284.

- Hamoush, S., McGinley, M., Mlakar, P., & Terro, M. (2002). Out-of-plane behavior of surface-reinforced masonry walls. *Construction and Building Materials*, 16(6), 341-351.
- Hartley, A., Mullins, G., & Sen, R. (1996). *Repair of Concrete Masonry Block Walls Using Carbon Fiber*. Paper presented at the Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Montreal, QC, Canada.
- Ingeominas. (1986). *El sismo de Popayán de marzo 31 de 1983*. Bogotá D.C.: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico – Mineras.
- Ingeominas. (1999). Terremoto del Quindío: Enero 25 de 1999. Informe Técnico Preliminar No. 2 Armenia – Quindío. (pp. 32). Bogotá D.C.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1997). *Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico (NTC 111)*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1998). *Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.8 mm de lado (NTC 220)*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003a). *Concretos. Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada (NTC 3546)*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003b). *Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería (NTC 3495)*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2005). *Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla (NTC 4017)*. Bogotá, D.C.: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales de concreto (NTC 673)*. Bogotá D.C.: ICONTEC.
- Kalali, A., & Kabir, M. (2012). Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests. *Engineering Structures*, 39, 24-37.
- Klingner, R. (2006). Behavior of masonry in the Northridge (US) and Tecomán–Colima (Mexico) earthquakes: Lessons learned, and changes in US design. *Construction and Building Materials*, 20(4), 209-219.
- Konthesingha, K. M. C., Masia, M. J., Petersen, R. B., Mojsilovic, N., Simundic, G., & Page, A. W. (2013). Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips – An experimental evaluation *Engineering Structures*, 50, 126-136.
- López, H. (2012). *Comportamiento de muros diafragma en mampostería de concreto reforzados con tejidos de FRP*. Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.
- López, S. (2013). *Evaluación del comportamiento de muros de mampostería no reforzada recubierta externamente con morteros reforzados*. Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.
- Luccioni, B., & Rougier, V. (2011). In-plane retrofitting of masonry panels with fiber reinforced composite materials. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1772-1788.

- Marcari, G., Manfredi, G., Prota, A., & Pecce, M. (2007). In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP. *Composites Part B: engineering*, 38(6-7), 887-901.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, & Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010a). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente* (Vol. 1). Bogotá D.C.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, & Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010b). *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente* (Vol. 2). Bogotá D.C.
- Molano, M. C. (2012). *Manual de ensayos de laboratorio en materiales de construcción para obras civiles*. Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C.
- Mosallam, A., & Banerjee, S. (2011). Enhancement in in-plane shear capacity of unreinforced masonry (URM) walls strengthened with fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(6), 1657-1670.
- Paulay T., & Priestley M.J. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. New York: Wiley.
- Ramírez, D. (2014). *Comportamiento dinámico de uniones viga-columna con anclajes epóxicos*. Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C.
- Riveros, J. (2009). Bogotá: ¿a punto de sufrir un terremoto? *Agencia de noticias UN* Retrieved 09/04, 2014, from <http://historico.unperiodico.unal.edu.co/Ediciones/100/09.html>
- San Bartolomé, Á. (1994). *Construcciones de Albañilería: Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural*. (1 ed.). Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- San Bartolomé, A., & Coronel, C. (2011). Reparación y reforzamiento de un muro de albañilería confinada mediante fibra de carbono (pp. 10). Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Santa María, H., & Alcaíno, P. (2008). *Resistencia al corte de muros de albañilería reforzados exteriormente con fibras*. Paper presented at the XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Santiago, Chile.
- Santa María, H., & Alcaíno, P. (2011). Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1172-1180.
- Schwegler, G. (1995). *Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones*. Paper presented at the Tenth European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, Netherlands.
- Servicio Geológico Colombiano. Sismo del 25 de enero de 1999. *Sismicidad Histórica de Colombia* Retrieved 24/02, 2014, from <http://agata.ingeo Minas.gov.co:9090/SismicidadHistorica/DetalleSismo.jsf?ind=5444>
- Servicio Geológico Colombiano. Sismo del 31 de marzo de 1983. *Sismicidad Histórica de Colombia* Retrieved 24/02, 2014, from <http://agata.ingeo Minas.gov.co:9090/SismicidadHistorica/DetalleSismo.jsf?ind=5442>
- Sika Colombia S.A. (2012). Manual de Productos 2012. In Sika Colombia S.A. (Ed.), (2012 ed., pp. 686). Bogotá D.C.: Sika Colombia S.A.
- Takeuchi, C. (2007a). Capítulo II: Materiales. *Comportamiento de la mampostería estructural*. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia.

- Takeuchi, C. (2007b). Capítulo IV: Prismas de Mampostería parte II *Comportamiento de la mampostería estructural*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Triantafyllou, T., Papanicolaou, C., & Lekka, M. (2011). Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels. *Construction and Building Materials*, 25(2), 504-514.
- Tumialan, G., Vatovec, M., & Kelley, P. (2009). FRP Composites for Masonry Retrofitting: Review of Engineering Issues, Limitations and Practical Applications. *Structure magazine*, 12-14.
- Turco, V., Secondin, S., Morbin, A., Valluzzi, M., & Modena, C. (2006). Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars. *Composites Science and Technology*, 66(2), 289-296.
- Valluzzi, M., Tinazzi, D., & Modena, C. (2002). Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates. *Construction and Building Materials*, 16(7), 409 – 416.
- Willis, C., Seracino, R., & Griffith, M. (2010). Out-of-plane strength of brick masonry retrofitted with horizontal NSM CFRP strips. *Engineering Structures*, 32(2), 547-555.