



Laboratori per a la Innovació
Tecnològica d'Estructures i Materials

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Análisis del comportamiento frente acciones cíclicas de muros de mampostería reforzados con materiales compuestos de matriz inorgánica y tejidos de fibras vegetales

Autor:

Luis Enrique Mercedes Cedeño

Director:

Lluís Gil Espert

Ernest Bernat Masó

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya
Programa de doctorado de Ingeniería Mecánica Fluido y Aeronáutica, Departamento de Resistencia de Materiales
Escuela Técnica Superior Ingeniería Industrial y Aeronáutica de Terrassa. Universidad Politècnica de Catalunya, *BarcelonaTECH*

Terrassa, 22 de mayo 2019

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecerles a todos mis familiares, en especial a mi madre Maritza y a mi hermana Maengrit por siempre apoyarme a lo largo de todos estos años dedicados a mi educación y superación profesional. También agradecerle a mi padre Enrique Mercedes, quien, a pesar de ya no estar con nosotros, es y siempre será mi ejemplo a seguir, pues con su forma responsable, entusiasta y alegre de vivir, logró inculcarme valores que me han ayudado a continuar desarrollándome como profesional y como persona.

Le agradezco a mi director y codirector de tesis Lluís Gil y Ernest Bernat por acogerme en su grupo de investigación, por sus directrices, entusiasmo, positivismo y paciencia a lo largo del desarrollo de esta tesis doctoral. Sin ustedes esta tesis no hubiera sido posible.

Le agradezco al Dr. Christian Escrig, y a los estudiantes universitarios Marc Davos y Celina Camboni, por su colaboración durante la primera etapa de las campañas experimentales desarrolladas en esta tesis.

Finalmente quiero agradecerles a todas las instituciones que de alguna manera sirvieron de apoyo para el desarrollo de esta tesis:

- Ministerio de Educación superior de ciencia y tecnología (Mescyt) de la República Dominicana.
- Universidad Politécnica de Catalunya (UPC)
- Laboratorio por la innovación tecnológica de estructuras y materiales (LITEM)
- Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (MINECO)
- Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del proyecto MULTIMAS (técnicas multiescala para el análisis experimental y numérico de la fiabilidad de las estructuras de mampostería, número de referencia BIA2015-63882-P)

Resumen

Con el fin de perseguir objetivos sostenibles en la industria de la construcción, se desarrolló, caracterizó y aplicó en muros de mampostería un nuevo material compuesto basado en mallas de fibras vegetales recubierta con resina y embebidas en una matriz cementicia de mortero.

En esta tesis, se fabricaron mallas de diferentes tipos de fibras vegetales (lino, cáñamo, sisal y algodón), y con ellas se fabricaron cerca de 100 especímenes de FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) para someterlos a ensayos de tracción, y de adherencia con unidades de mampostería. Una vez caracterizados los FRCM de fibras vegetales se eligieron dos tipos de fibras a utilizar para reforzar muros de mampostería. Los resultados mostraron una excelente interacción entre las fibras vegetales y una de las matrices de mortero ensayadas. El recubrimiento con resina mejoró las propiedades mecánicas de los hilos y evitó las típicas fallas de deslizamiento en los compuestos de FRCM.

Para el refuerzo de los muros se eligió el FRCM de cáñamo y de algodón. Pues el FRCM de cáñamo fue el que alcanzó mayor resistencia mecánica, mientras que el FRCM de algodón tuvo la mayor capacidad de elongación y de multifisuración. Estos refuerzos aumentaron de manera significativa la resistencia a cortante y la capacidad de disipar energía de los muros de mampostería sin reforzar, mostrando una mejor eficiencia que los muros reforzados con FRCM de fibras de vidrio (también ensayados en este estudio) frente a cargas cíclicas. Además, el uso de un mayor volumen de fibras en el caso del FRCM de las fibras vegetales permitió reducir el volumen de la matriz cementicia (0,5 y 5%), en contraste con el FRCM de fibra de vidrio), lo que redujo el peso específico del FRCM y el consumo de mortero.

También, se propusieron modelos analíticos y numéricos para el análisis de los especímenes de FRCM y muros fabricados en este estudio. Los resultados experimentales ajustaron los parámetros del modelo analítico y numérico. Estos modelos fueron herramientas de cálculo efectivas para reproducir el comportamiento del FRCM y los muros de la mampostería reforzados con FRCM, en el caso que la conexión entre malla-mortero y mortero-mampostería sea lo suficientemente buena para evitar los fallos por deslizamiento de la malla y desprendimiento del mortero.

En general esta tesis representa un gran paso en la temática del uso de fibras vegetales dentro de matrices cementicias. Pues a partir de la baja densidad, bajo coste y sostenibilidad que representan las fibras vegetales fue posible desarrollar un compuesto de mayor sostenibilidad y eficiencia (en contraste con FRCM de fibras sintética usadas en este estudio), capaz de mejorar las prestaciones mecánicas de muros de mamposterías frente a carga cíclicas.

Abstract

In order to pursue sustainable objectives in the construction industry, a new composite material using vegetal fabric coated with resin and embedded into mortar was developed, characterized and applied on masonry walls.

In this study, fabrics of different types of vegetal fibres (flax, hemp, sisal, and cotton) coated with resins were manufactured, and with them, FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) specimens were produced for tensile tests and bonding tests with masonry units. Once characterized the FRCM of vegetal fibers specimens, two types of fibres were chosen to reinforce masonry walls. Results showed an excellent interaction between vegetal fibres and mortar matrix. The coating with resins improved the mechanical properties of the yarns and avoided the typical slipping failures in FRCM composites.

For strengthening masonry walls, hemp and cotton FRCM were chosen. Hemp FRCM was the composite that reached the highest mechanical strength, whereas cotton FRCM had the greatest elongation capacity and multicracking response. These strengthening systems increased significantly the shear strength and the ability to dissipate energy from the unreinforced masonry walls, showing even better efficiency than glass FRCM strengthened walls (also tested in this study) under cyclic loading. In addition, the use of a greater volume of fibres in the case of the FRCM of vegetal fibres allowed reducing the volume of cementitious matrix to be used (0.5 and 5%, contrasted with glass-FRCM), which reduced the specific weight of the FRCM.

In addition, analytical and numerical models were proposed for the analysis of FRCM and wall specimens manufactured and tested in this study. Their experimental results adjusted the parameter of analytical and numerical models. These models were effective calculation tools to reproduce FRCM specimens and masonry walls reinforced with FRCM behavior, where the connection between mesh-mortar and mortar-masonry is good enough to avoid failures due to mesh sliding and mortar debonding.

In general, this thesis represents a great step in the topic of the use of vegetable fibers within cementitious matrices. Well, from the low density, low cost and sustainability that represent vegetal fibres it was possible to develop a composites with greater sustainability and efficiency (in contrast with the synthetic fibers FRCM used in this study), able to improve the mechanical performance of masonry walls subjected to cyclic loading.

Tabla de Contenido

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Lista de figuras.....	7
Lista de tablas.....	10
Notación y definiciones.....	11
Capítulo I. Introducción y Objetivos.....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Objetivos.....	16
Capitulo II. Estado del Arte.....	20
2.1. La mampostería frente acciones sísmicas.....	20
2.1.1. Tensión diagonal.....	22
2.1.2. Carga cíclica.....	24
2.2. Refuerzo de mampostería con FRCM.....	27
2.2.1. Acción del FRCM a cortante.....	29
2.3. Las fibras vegetales en los materiales compuestos.....	31
2.3.1 Problemas de alcalinidad.....	36
2.4. Modelos analíticos de muros de mampostería reforzados y sin reforzar con FRCM.....	37
2.4.1. Modelos analíticos de muros de mampostería.....	37
2.4.2. Modelos analíticos de muros reforzados con FRCM.....	38
2.5. Modelos numéricos de muros de mampostería reforzados y sin reforzar con FRCM.....	39
2.5.1. Modelos numéricos de muros de mampostería.....	39
2.5.2. Modelos numéricos de muros reforzados con FRCM.....	40
Capitulo III. Caracterización de fibras vegetales y elaboración de mallas.....	43
3.1. Introducción.....	43
3.2. Materiales.....	44
3.2.1 Hilos y mechones.....	44
3.2.2 Resinas.....	44
3.3. Cuantificación de resina aplicada.....	45

3.4.	Preparación de los especímenes y configuración del ensayo a tracción	45
3.5.	Resultados y discusiones	47
3.6.	Diseño y elaboración de las mallas.....	52
3.6.1.	Propiedades mecánicas de mechones.....	56
3.6.2.	Propiedades de las mallas	57
3.7.	Conclusiones	58
Capitulo IV. Caracterización de FRCM de fibras vegetales		60
4.1.	Introducción.....	60
4.2.	Materiales.....	61
4.2.1.	Mallas	61
4.2.2.	Matriz.....	61
4.3.	Comportamiento del FRCM a tracción.....	62
4.3.1.	Fabricación de especímenes.....	62
4.3.2.	Configuración de ensayo a tracción de FRCM.....	63
4.3.3.	Resultados y discusiones	64
4.4.	Adherencia de FRCM con con ladrillos	73
4.4.1.	Fabricación de especímenes de FRCM en ladrillo	73
4.4.2.	Configuración de Ensayo.....	74
4.4.3.	Resultados y Discusiones	75
4.5.	Conclusiones	77
Capitulo V. Estudio experimental de muros de mampostería reforzados con FRCM de fibras vegetales sometidos a ensayos de carga cíclica		78
5.1.	Introducción.....	78
5.2.	Materiales.....	79
5.2.1.	Ladrillos	79
5.2.2.	Morteros.....	79
5.2.3.	Mampostería.....	80
5.2.4.	Mallas	80
5.3.	Diseño, construcción y refuerzo de los muros.....	82
5.4.	Configuración del ensayo de carga cíclica	83
5.5.	Análisis y Discusiones.....	86
5.5.1.	Tipos de fallos	86

5.5.2.	Propiedades mecánicas de muros bajo carga cíclica	87
5.5.3.	Comparación de efectividad de FRCM de fibras vegetales y FRCM de fibra de vidrio.....	96
5.6.	Conclusiones	100
Capítulo VI. Estudio analítico de FRCM a tracción y muros de mampostería reforzados con FRCM sometidos a carga cíclica.....		101
6.1.	Introducción.....	101
6.2.	Estudio analítico del FRCM a tracción.....	101
6.3.	Estudio analítico de muros reforzados con FRCM de fibras vegetales	108
6.4.	Conclusiones	117
Capítulo VII. Modelo Numérico de FRCM a tracción y muros de mampostería reforzados con FRCM sometidos a un ensayo de carga cíclica.....		119
7.1.	Introducción.....	119
7.2.	Modelo numérico del FRCM a tracción.....	119
7.3.	Modelo numérico de muros de mampostería reforzados y sin reforzar con FRCM sometidos a cargas cíclicas.....	131
7.4.	Conclusiones	143
Capítulo VIII. Conclusiones generales y futuras líneas de investigación.....		145
8.1.	Conclusiones generales	145
8.2.	Futuras líneas de investigación	148
Capítulo IX. Referencias.....		150
Anexo A. Datos experimentales de caracterización de hilos y mechones, y especímenes de FRCM.....		156
A.1.	Introducción.....	156
A.2.	Materiales.....	156
A.3.	Caracterización de Hilos y mechones	166
A.4.	Caracterización de morteros	170
A.5.	Caracterización de FRCM a tracción.....	175
A.6.	Adherencia del FRCM	178
Anexo B. Datos experimentales de ladrillos, mortero de juntas, muros sometidos a carga cíclicas.....		181
B.1.	Introducción.....	181
B.2.	Materiales.....	181

B.3. Fabricación de muros de mampostería y refuerzo	184
B.4. Ensayo por carga cíclica de muros	184
B.5. Proceso de análisis de resultados de ensayo por carga cíclica	193
Anexo C. Datos analíticos y numéricos de FRCM y muros sometidos a carga cíclicas	205
C.1. Introducción	205
C.2. Modelo analítico	205
C.3. Modelo numérico	206

Lista de figuras

Figura 1.1. Esquema representativo de las actividades a desarrollar	19
Figura 2.1. Obras históricas de mampostería: (a) Ruinas de Jericó (http://www.primeroscristianos.com/jerico-tierra-santa), (b) Pirámide de Egipto (https://www.20minutos.es/minuteca/piramides-de-egipto), (c) Gran Muralla China (https://www.elpais.com.uy/vida-actual/protegeran-gran-muralla-china-inteligencia-artificial-drones.html), (d) Pirámide de Yucatán (https://sipse.com/milenio/descubrimiento-cenote-piramide-chichen-itza-kukulcan-unam-165542.html)	21
Figura 2.2. Ensayo de compresión diagonal [4].....	23
Figura 2.3. Modos de falla de ensayos de compresión diagonal [5]: a) falla por las piezas, b) falla por las juntas, c) falla mixta	24
Figura 2.4. Ensayo por carga cíclica [6].....	24
Figura 2.5. Degradación de la rigidez [7].....	25
Figura 2.6. Comportamiento histerético de la mampostería no reforzada [7].....	26
Figura 2.7. Colocación del FRCM [11].....	28
Figura 2.8. Fisuración de muros sometidos a compresión diagonal [14]: (a) sin reforzar, (b) reforzado con FRCM.....	31
Figura 2.9. Reforzamientos de vigas con FRP de lino [23]	33
Figura 2.10. Muros reforzados con FRCM de lino y PBO, sometidos a ensayos de carga excéntricas [12]	34
Figura 2.11. Muros reforzados con FRCM de mallas de cáñamo impregnadas con resina, sometidos a ensayo de compresión diagonal [18]	35
Figura 3.1. Preparación de especímenes de hilos.....	46
Figura 3.2. Configuración de ensayo a tracción de los hilos.....	46
Figura 3.3. Influencia de las resinas en las propiedades mecánicas de los hilos: (a) Tensión Máxima, (b) Modulo de elasticidad.....	49

Figura 3.4. Diagrama de esfuerzo-deformación de hilos de fibras vegetales.....	51
Figura 3.5. Diagrama de esfuerzo-deformación de hilos de fibras Sintéticas	51
Figura 3.6. Diseño de mallas con mechones sin tejer	52
Figura 3.7. Diseño de mallas con mechones tejidos.....	53
Figura 3.8. Elaboración de mallas de fibras vegetales	54
Figura 4.1. Ensayo a flexión y compresión de controles de mortero	61
Figura 4.2. Fabricación de especímenes de FRCM.....	62
Figura 4.3. Ensayo a tracción de FRCM	63
Figura 4.4. Modos de fallo de FRCM	64
Figura 4.5. Tensiones de fisuración	68
Figura 4. 6. Rendimiento de mallas en el FRCM.....	69
Figura 4. 7. Diagramas de esfuerzo-deformación de FRCM: Mallas con epoxi y poliéster	72
Figura 4.8. Diagramas de esfuerzo-deformación de FRCM: Mallas con epoxi (diferentes espesores y técnica de tejido), y mallas de fibras sintéticas	72
Figura 4.9. Preparación de especímenes para ensayo de adherencia	73
Figura 4.10. Configuración de ensayo de adherencia	74
Figura 4.11. Modos de fallos de ensayo de adherencia.....	75
Figura 5.1. Mallas de Refuerzo: (a) Malla de Cábano, (b) Malla de Algodón, (c) Malla de fibra de vidrio (Mapegrid G220)	81
Figura 5.2. Geometrías de Muros de mampostería	82
Figura 5. 3. Reforzamiento de muros	83
Figura 5.4. Configuración de ensayo por carga cíclica	85
Figura 5.5. Desplazamientos Impuestos.....	85
Figura 5.6. Fallos de especímenes: WN, WNM y WG	86
Figura 5.7. Fallos de especímenes: WH y WC.....	87
Figura 5.8. Diagramas de histéresis y curvas envolventes	88
Figura 5.9. Detalle de modelo bilineal, y definición de energías[70][71].....	89
Figura 5.10. Comparación de modelos bilineales	91
Figura 5.11. Variación de cortante máximo y energía disipada	92
Figura 5.12. Propiedades de muros a carga cíclica: (a) Degradación de rigidez. (b) Factor de amortiguamiento, (c) Deriva residual, (d) índice de daño.....	93
Figura 5.13. Incrementos de propiedades debido a la malla: (a) diagrama idealizado de fuerza-desplazamiento, (b) ratios de incrementos de propiedades.	97
Figura 6.1. Curva típica experimental de esfuerzo-deformación del FRCM a tracción y modelo ACK [66].....	102
Figura 6.2. Comportamiento teórico del hormigón a tracción	105
Figura 6.3. Comparación de los resultados experimentales y analíticos del FRCM.....	107
Figura 6.4. Curvas bilineales de modelo analítico y resultados experimentales: azul claro=WN, azul oscuro=WH, naranja=WC, amarillo=WG.....	117

Figura 7. 1. Modelo uniaxial [50]: (a) tracción, (b) compresión	120
Figura 7. 2. Modelo a tracción uniaxial del mortero	125
Figura 7. 3. Mallado de FRCM: (a) Solido deformable, (b) Elemento tipo truss	125
Figura 7. 4. Fallos de modelos de FRCM	126
Figura 7. 5. Modelo a tracción uniaxial modificado	128
Figura 7. 6. Modelos modificados de FRCM de sisal y algodón	129
Figura 7. 7. Diagrama esfuerzo-deformación de especímenes de FRCM a tracción	130
Figura 7.8. Modelo numérico de muro de mampostería sin reforzar: (a) sin mallar, (b) mallado ..	132
Figura 7. 9. Curva esfuerzo-deformación de FRCM sometidos a tracción	135
Figura 7.10. Mallado de muros reforzados con FRCM: (a) elementos triangulares de refuerzo, (b) strips, (c) Refuerzo (FRM), (d) Muro reforzado con FRCM	136
Figura 7.11. Fallos de muros reforzados y sin reforzar	137
Figura 7.12. Apertura de contactos en muros de mampostería	138
Figura 7.13. Comparación de diagramas de histéresis de muros reforzados y sin reforzar con FRCM	140
Figura 7.14. Comparación de curvas bilineales de modelos numéricos, experimental y analítico .	141
Figura 7. 15. Comparación de propiedades de modelo numérico y experimental: (a) degradación de rigidez, (b) factor de amortiguamiento, (c) índice de daño	142
Figura A.1. Hilos de fibras vegetales	157
Figura A. 2. Malla Fidbasalt Grid 300 C95.....	159
Figura A.3. Malla X Mesh C10.....	160
Figura A.4. Malla Mapegrid G220.....	161
Figura A.5. Preparación de especímenes de hilo y mechones para ensayo de tracción	168
Figura A. 6. Ensayo tracción de hilos y mechones	168
Figura A.7. Máquina de Ensayo MTS Insight.....	169
Figura A.8. Molde de Probetas control de morteros	170
Figura A.9. Ensayo a flexión de probetas control	171
Figura A.10. Máquina de ensayo Suzpecar.....	171
Figura A.11. Ensayo de probetas control a compresión.....	172
Figura A. 12. Preparación de molde y especímenes de FRCM.....	175
Figura A.13. Colocación de placas de apoyo	176
Figura A.14. Configuración de ensayo a tracción de FRCM	177
Figura A.15. Configuración de ensayo de adherencia.....	179
Figura B. 1. Estructura de aplicación de carga cíclica	185
Figura B.2. Patines de carga.....	186
Figura B.3. Topes laterales para limitar el deslizamiento	187
Figura B. 4. Estructura de impedimento de giro del muro bajo carga cíclica	187
Figura B.5. Colocación de potenciómetros (LWR).....	188
Figura B.6. Conexión de muro con estructura de aplicación de carga cíclica.....	189

Figura B.7. Ensayo de carga cíclica	189
Figura B.8. Fallos de muros reforzados y sin reforzar	193
Figura B 9. Diagrama de histéresis	194
Figura B.10. Modelo bilineal	195
Figura B. 11. Degradación de rigidez	201
Figura B.12. Factor de amortiguamiento.....	202
Figura B. 13. Deriva residual	203
Figura B.14. Índice de daño	204
Figura C.1. Condiciones de contorno del FRCM.....	207
Figura C.2. Estados tensionales de las mallas del FRCM al momento del fallo	208
Figura C. 3. Condiciones de contorno de muros sometidos a cargas cíclicas	209
Figura C.4. Estados tensionales de muros y FRCM.....	212

Lista de tablas

Tabla 2.1 Ventajas de las fibras naturales frente a la fibra de vidrio [20].....	32
Tabla 2.2 Comparación de propiedades entre las fibras naturales y de vidrio [20][21][19]	32
Tabla 3.1 Propiedades de los hilos	44
Tabla 3.2 Propiedades de las resinas	44
Tabla 3.3 Propiedades de los hilos y cuantificación de la resina	45
Tabla 3.4 Resultados de ensayo a tracción de los hilos.....	47
Tabla 3.5 Nomenclatura de mallas	55
Tabla 3.6 Propiedades de mechones tejidos.....	56
Tabla 3.7 Resultados de ensayo a tracción de mechones	57
Tabla 3.8 Propiedades mecánicas de las mallas	58
Tabla 4. 1 Propiedades de morteros	61
Tabla 4.2 Resultados de ensayo a tracción de FRCM.....	67
Tabla 4.3. Resultados de ensayo de adherencia	76
Tabla 5.1 Resultados de las pruebas en ladrillos.....	79
Tabla 5.2. Propiedades de mampostería.....	80
Tabla 5.3 Propiedades de las mallas.....	81
Tabla 5.4 Nomenclatura de especímenes de muros	82
Tabla 5.5. Resultados de ensayos por carga cíclica	90
Tabla 5.6. Relación incremento de propiedades mecánica debido a la malla y las propiedades mecánica de la malla	96
Tabla 5.7. Relación incremento de cortante máximo y energía disipada con peso específico de FRCM.....	98

Tabla 5.8. Relación incremento de cortante máximo y energía disipada con coste de FRCM	99
Tabla 6.1. Resultados del análisis analítico de especímenes de FRCM.....	104
Tabla 6.2. Resultados de análisis de resistencia a cortante de muros sin reforzar	113
Tabla 6.3. Resultados de análisis de resistencia a cortante de muros reforzados.....	113
Tabla 6.4. Resultados de análisis de deformación de fallo.....	116
Tabla 7.1. Resultados de modelos numéricos de FRCM	127
Tabla 7.2. Resultados de modelo numérico de muros reforzados y sin reforzar con FRCM.....	139
Tabla A.1. Propiedades de hilos de cáñamo.....	157
Tabla A.2. Propiedades de hilos de sisal	158
Tabla A.3. Propiedades de hilos de Algodón	158
Tabla A.4. Propiedades de la malla Fidbasalt Grid 300 C95	159
Tabla A.5. Propiedades de X Mesh C10	160
Tabla A.6. Propiedades de Mapegrid G220	161
Tabla A. 7. Propiedades mecánicas de resina MasterBrace P 3500.....	162
Tabla A.8. Propiedades mecánicas de resina SILMAR SIL66BQ.....	163
Tabla A. 9. Propiedades mecánicas de resina Cronolita 3015	163
Tabla A.10. Propiedades mecánicas de mortero Sika	164
Tabla A. 11. Propiedades mecánicas de mortero Nivoplan	165
Tabla A.12. Cuantificación de resina en hilos de fibras vegetales.....	166
Tabla A.13. Resultados de ensayo a flexión y a compresión de morteros	174
Tabla B.1. Propiedades de mortero KeraKoll-Biocalce-Muro	182
Tabla B.2. Resultados de ensayo de probetas control Kerakoll	183
Tabla B.3. Valores de máximos por ciclo desplazamiento impuestos	196
Tabla C.1. Cálculos del modelo ACK.....	205
Tabla C. 2. Cálculos de modelos ajustados.....	206
Tabla C. 3. Cortante máximo por ciclos de cargas.....	209

Notación y definiciones

A_h (mm²) = Área de sección transversal de hilo

A_m (mm²) = Área de sección transversal de mechón

A_t (mm²) = Área de sección transversal de tejido

A_n (mm²) = Área de corte paralela la dirección de las tensiones de corte

$A_{h,FRCM}$ (mm²) = Área homogeneizada del FRCM

$\alpha_{e2} (/) =$ Relación de elasticidad (E_f/E_m)

$\beta (/) =$ Coeficiente de ajuste para fibras de menor módulo de elasticidad que la matriz.

$D (/) =$ Índice de daño

D_u (mm) = Daño causado por deformación excesiva

D_e (mm) = Daño causado por energía disipada

δ_c (mm) Desplazamiento correspondiente al cortante de fisuración

δ_e (mm) = Desplazamiento efectivo correspondiente a la extrapolación del estado límite de fisuración

δ_{max} (mm) = Desplazamiento correspondiente al cortante máximo del muro

δ_f (mm) = Desplazamiento de fallo del muro

δ_i (mm) = Desplazamiento en la fuerza máxima del i-ésimo ciclo

E_d (KN-mm) = Energía disipada

E_{di} (KN-mm) = Energía disipada en el i-ésimo ciclo

E_{td} (KN-mm) = Energía total disipada

E_{pi} (KN-mm) = Energía aplicada en el i-ésimo ciclo

$\int dE_{di}$ (KN-mm) = Energía histerética acumulada

E_h (GPa) = Módulo de elasticidad de hilo

E_m (GPa) = Módulo de elasticidad de mechón

E_f (GPa) = Módulo de elasticidad de la fibra

E_{mo} (GPa) = Módulo de elasticidad del mortero

E_I (GPa) = Módulo de elasticidad en la etapa I del FRCM a tracción

E_{II} (GPa) = Módulo de elasticidad en la etapa II del FRCM a tracción

E_{III} (GPa) = Módulo de elasticidad en la etapa III del FRCM a tracción

ΔE (GPa) = Variación del módulo de elasticidad en la zona III con respecto al módulo de elasticidad del hilo

E_w (GPa) = Modulo de elasticidad de muro sin reforzar

E_{wr} (GPa) = Modulo de elasticidad de muro reforzado

$\epsilon_{h,peak}$ (%) = Deformación pico de hilo

$\epsilon_{m,peak}$ (%) = Deformación pico de mechón

$\varepsilon_{c,peak}$ (%) = Deformación pico del compuesto de FRCM
 ε_{sm} (/) = Deformación media en el refuerzo
 ε_{cm} (/) = Deformación media en el hormigón
 ε_I (%) = Deformación unitaria al final de la zona I
 ε_{II} (%) = Deformación unitaria al final de la zona II
 ε_{III} (%) = Deformación unitaria al final de la zona III
 $F_{h,u}$ (N) = Fuerza ultima de hilo
 $F_{m,u}$ (N) = Fuerza ultima de mechón
 $F_{c,u}$ (N) = Fuerza ultima de compuesto de FRCM
 F_i (N) = Fuerza máxima en el i-ésimo ciclo
 f_{xm} (MPa) = Resistencia a flexión del mortero
 f_{tm} (MPa) = Resistencia a tracción del mortero debido a flexión
 f_{cm} (MPa) = Resistencia a compresión del mortero
 $f_{c,cm}$ (MPa) = Resistencia a compresión de FRCM
 $f_{t,w}$ (MPa) = Resistencia a tracción de la mampostería
 f_w (MPa) = Resistencia a compresión de la mampostería
 f_{fv} (MPa) Tensión de diseño a cortante
 G_w (GPa) = Modulo de cortante del muro sin reforzar
 K_e (KN/mm) = Rigidez elástica de corte
 k_t (/) = Factor dependiente de la duración de la carga
 L (mm) = Longitud del muro paralela a la dirección de la fuerza de cortante aplicada
 λ_c (/) = Factor obtenido a partir del análisis de regresión realizado por Kwok y Ang
 n (/) = Numero de capas de refuerzo aplicado sobre el muro
 φ (/) = Coeficiente experimental de mayoración de resistencia a cortante de muros reforzados con FRCM
 $\rho_{p,eff}$ (/) = Relación de refuerzo (A_f/A_m)
 $\sigma_{h,u}$ (MPa) = Tensión ultima de hilo
 $\sigma_{m,h}$ (MPa) = Tensión ultima de mechón
 σ_{mc} (MPa) = Tensión de multifisuras

$\sigma_{c,u}$ (MPa) = Tensión última de compuesto de FRCM

σ_{cp} (MPa) = Esfuerzo de compresión aplicado sobre el muro

ξ_i (/) = Coeficiente de amortiguamiento viscoso del i-ésimo ciclo

$s_{r,max}$ (mm) = Ancho máximo de fisuras

θ (°) = Ángulo entre la diagonal de los muros y la longitud horizontal paralela al punto de aplicación de la carga cíclica

τ_0 (MPa) = Resistencia de adherencia entre junta de mortero y mampuesto

μ (/) = Coeficiente de ductilidad

μ_0 (/) = Coeficiente de fricción a cortante

V_{max} (KN) = Cortante máximo de muro

V_n (KN) = Resistencia a cortante de muro reforzado con FRCM

V_w (KN) = Resistencia a cortante de muro sin reforzar

V_f (KN) = Aporte de resistencia a cortante del refuerzo al muro

V_{ss} (KN) = Cortante de fallo por deslizamiento

V_{sf} (KN) = Cortante de fallo por fricción de corte

V_{dt} (KN) = Cortante de fallo por tensión diagonal

ν (/) = Coeficiente de poisson

ν_{fr} (/) = Fracción volumétrica de fibra

ν_m (/) = Fracción volumétrica de mortero

ν_w (/) = Fracción volumétrica del muro sin reforzar

ν_{FRCM} (/) = Fracción volumétrica de FRCM

w_k (mm) = Ancho de fisura

Capítulo I. Introducción y Objetivos

1.1. Introducción

La mampostería es uno de los materiales más utilizados en la construcción de obras civiles. Su uso se remonta a las primeras civilizaciones que poblaron la tierra, donde las construcciones eran realizadas a partir de reglas empíricas y diseñadas sólo para soportar acciones gravitatorias.

En la actualidad la mampostería representa uno de los principales sistemas de construcción, pues la resistencia a compresión, la estética tradicional que representa, su bajo coste, junto con la experiencia y conocimiento sobre su aplicación, han hecho de ésta uno de los materiales más antiguos, utilizado actualmente en la construcción de obras civiles.

Sin embargo, en las últimas décadas, los daños registrados como consecuencia de acciones sísmicas han dado origen a un desarrollo importante en el área de refuerzo y rehabilitación de este tipo de estructuras. Sobre todo, en las estructuras ejecutadas antes de la aparición de los códigos que obligan tener en cuenta los criterios de diseño frente acciones sísmica, y así también la extensión de la durabilidad y de la vida útil de las estructuras.

Por tanto, existe una clara necesidad de refuerzo y rehabilitación para mantener las estructuras el mayor tiempo de uso a un coste global (incluyendo factores ambientales) competitivo con respecto a la alternativa de demoler y construir de nuevo.

Como consecuencia, a lo largo de los años se ha buscado desarrollar técnicas cada vez más eficientes y sostenibles de refuerzo estructural que den respuesta a los daños acumulados por el tiempo, por las acciones accidentales o por fallos de diseños que no han tenido en cuenta ciertas consideraciones.

En el caso específico de la mampostería existen una gran variedad de guías y técnicas [1] ya experimentadas que pueden ser consideradas como técnicas de refuerzo o rehabilitación, como son: el confinamientos del muros con vigas y columnas de hormigón, recrecido estructural con hormigón armado, confinamiento de aberturas, reemplazo de muros no estructurales, costura de grietas con barras de refuerzo, refuerzo con FRP (Fibre Reinforced Polymers) y, el utilizado en este estudio, el FRCM.

El mortero reforzado con tejidos (Fabric Reinforced Cementitious Matrix: FRCM) es un material compuesto formado por una malla embebida en una matriz inorgánica de mortero que surge como una opción alternativa a la matriz orgánica del FRP, pues al tener menos emisiones tóxicas, mayor resistencia al fuego, permeabilidad al vapor del agua, entre otras ventajas, los investigadores lo ven como un posible sustituto del FRP, en el campo de refuerzo y rehabilitación de estructuras.

No obstante, los compuestos de FRCM presentan dos inconvenientes técnicos aún a superar: sus elevadas rigideces dificultan la disipación de energía frente a solicitaciones dinámicas, lo que resulta en una concentración de tensiones sobre la estructura existente, y la obtención de las fibras sintéticas usadas en dichos compuestos supone un elevado coste económico y ambiental.

Atendiendo a lo anterior, el aprovechamiento de los recursos naturales y los materiales sostenibles es un tema que cada día adquiere mayor interés de la comunidad científica, la alternativa de usar fibras vegetales como refuerzos de polímeros y morteros, es un ejemplo de ello. Las propiedades mecánicas que han mostrados fibras como el lino, cáñamo, sisal, jute, plátano, entre muchas otras, junto con su bajo costo, baja densidad, reciclabilidad y biodegradabilidad, han hecho de las fibras vegetales una potente alternativa frente a fibras sintéticas.

Por lo que, atendiendo a la necesidad de reforzar estructuras de mampostería ubicados en zonas de alta sismicidad, es de interés analizar el comportamiento de muros de mampostería frente a acciones cíclicas y evaluar las prestaciones de estos al reforzarlos con FRCM de fibras vegetales.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es analizar algunas fibras vegetales, alternativas a las fibras sintéticas, para el desarrollo de compuestos de FRCM, identificar el proceso de transmisión de esfuerzos entre la matriz y las fibras vegetales, y aplicar estos refuerzos de FRCM de fibras vegetales en muros de mampostería destinado a ser sometidos a ensayos de

cargas cíclicas, y a partir de esto desarrollar herramientas de cálculo útiles para el análisis y el diseño de refuerzo de muros con FRCM de fibras vegetales.

1.2.1 Objetivos específicos

Para realizar este estudio se plantean los siguientes objetivos específicos:

Estudiar el estado del conocimiento sobre los siguientes temas:

- ✓ Comportamiento de muros de mampostería frente acciones sísmicas
- ✓ Comportamiento del FRCM como técnica de refuerzo.
- ✓ Reforzamiento de muros de mampostería con FRCM.
- ✓ Comportamiento de las fibras vegetales en el FRCM como material compuesto.
- ✓ Modelos numéricos y analíticos de muros de mampostería reforzados con FRCM.

Determinar las propiedades mecánicas de diferentes tipos de hilos de fibras vegetales y utilizar diferentes tipos de revestimiento para mitigar los daños de las fibras dentro de la matriz cementicia, y a partir de éstos, diseñar mallas de fibras vegetales.

- ✓ Diseñar una metodología de ensayo basada en normativa y/o estudios similares.
- ✓ Analizar los resultados e identificar las fibras con mejores propiedades para este estudio.
- ✓ Determinar la influencia del revestimiento con resina en las propiedades mecánicas de hilos de fibras vegetales.
- ✓ Comparar los resultados de los hilos de fibras vegetales con los mechones de fibras sintética.
- ✓ Diseñar y establecer un procedimiento para la elaboración de mallas de fibras vegetales tomando como referencia la geometría de mallas técnicas diseñada para refuerzo del FRCM.

Analizar el comportamiento de los FRCM de fibras vegetales mediante un ensayo de tracción y adherencia con unidades de ladrillos y, a partir de éstos, seleccionar los FRCM más adecuados para reforzar muros de mampostería sometidos a carga cíclica.

- ✓ Diseñar una metodología de ensayo basado en alguna normativa, o estudios realizados con anterioridad.
- ✓ Identificar los mecanismos de fallos presentados en los ensayos de tracción (tejido-matriz) y adherencia (FRCM-unidades de ladrillo).
- ✓ Comparar los resultados de FRCM de fibras vegetales con FRCM de fibras sintéticas.
- ✓ Analizar los resultados e identificar los FRCM que presenten mejor comportamiento a tracción.

Analizar el comportamiento de muros de mampostería reforzados con FRCM de fibras vegetales a partir de ensayos de carga cíclica.

- ✓ Diseñar y elaborar las mallas a utilizar como refuerzo, utilizando como referencias las mallas comerciales comúnmente utilizadas para reforzar muros con FRCM.
- ✓ Reforzar los muros con FRCM de fibra vegetales y con un FRCM de fibra de vidrio (especímenes de contraste).
- ✓ Diseñar la configuración de ensayo de carga cíclica, y someter los muros a dicho ensayo.
- ✓ Comparar la eficiencia en la mejora de las propiedades mecánicas de los muros reforzados con mallas de fibras vegetales con los reforzados con malla de fibras de vidrio.
- ✓ Determinar el aporte de resistencia y capacidad de disipar energía del FRCM de fibras vegetales a los muros de mampostería, e identificar el tipo de malla más efectiva.

Realizar un estudio analítico de los especímenes de FRCM y muros reforzados y sin reforzar con FRCM.

- ✓ Analizar los especímenes de FRCM y muros tomando como referencia métodos analíticos utilizados por otros estudios.
- ✓ Proponer modelos analíticos que se ajusten a los resultados obtenidos experimentalmente.
- ✓ Comparar los resultados del estudio analítico con los obtenidos experimentalmente.

Desarrollar modelos numéricos de especímenes de FRCM y muros reforzados y sin reforzar con FRCM.

- ✓ Identificar los parámetros de diseño necesarios para realizar modelos de elementos finitos de los especímenes de FRCM y muros ensayados en esta tesis.
- ✓ Elaborar modelos de elementos finitos utilizando un software comercial.
- ✓ Comparar los resultados de los modelos de elementos finitos con los resultados experimentales y analíticos.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema representativo del proceso de desarrollo de esta tesis, a partir de los objetivos y actividades desarrolladas para alcanzar dichos objetivos.

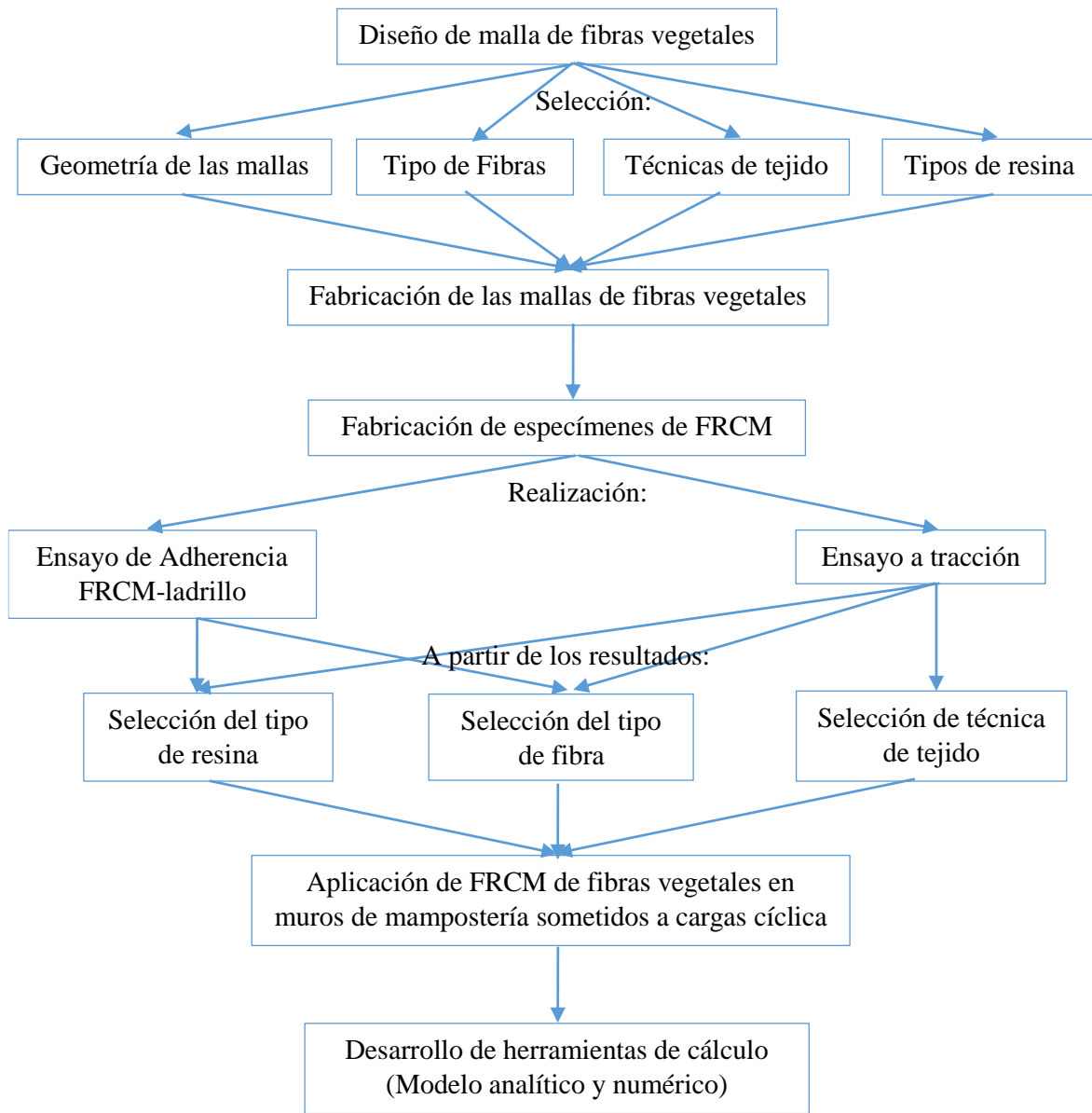


Figura 1.1. Esquema representativo de las actividades a desarrollar

Capítulo II. Estado del Arte

2.1. La mampostería frente acciones sísmicas

La mampostería es uno de los materiales más utilizados en la historia de las civilizaciones. Las ruinas de Jericó (Medio Oriente, 7350 a.c), las pirámides de Egipto (2500 a.c), la gran muralla China (200 a.c a 220 d.c), las pirámides de Yucatán en México (500 d.c) (Figura 2.1), son sólo algunos ejemplos de construcciones que dan testimonio del uso y durabilidad de este material.

La resistencia a compresión, la estética tradicional que representa, su bajo coste, junto con la experiencia y conocimiento sobre su aplicación, han hecho de la mampostería uno de los materiales más antiguos utilizados actualmente en la construcción de obras civiles.



(a)



(b)



(c)

(d)

Figura 2.1. Obras históricas de mampostería: (a) Ruinas de Jericó (<http://www.primeroscristianos.com/jerico-tierra-santa>), (b) Pirámide de Egipto (<https://www.20minutos.es/minuteca/piramides-de-egipto>), (c) Gran Muralla China (<https://www.elpais.com.uy/vida-actual/protegeran-gran-muralla-china-inteligencia-artificial-drones.html>), (d) Pirámide de Yucatán (<https://sipse.com/milenio/descubrimiento-cenote-piramide-chichen-itza-kukulcan-unam-165542.html>)

Inicialmente, la mampostería es un material concebido para resistir cargas verticales, es decir, que uno de los principales factores que debe ser considerado en el diseño, es la resistencia a la compresión. No obstante, estas estructuras se ven afectadas por otro tipo de acciones, tales como las cargas de viento y los sismos, que finalmente se traducen en cargas accidentales que deben ser soportadas por la estructura. Debido a esto se exige considerar la resistencia a cortante y a tracción de la mampostería.

La dinámica del efecto sísmico en una estructura consiste en un fenómeno natural provocado por la liberación de energía acumulada en la corteza terrestre, en forma de ondas sísmicas, las cuales se traducen en cargas cíclicas sobre las estructuras, condicionadas por la frecuencia y magnitudes de estas ondas. Las cargas cíclicas o sísmicas ejercidas accidentalmente en las estructuras inducen a desplazamientos laterales en toda la estructura, que a su vez se convierten principalmente en periodos de vibración y fuerzas cortantes, que pueden generar la degradación de la rigidez o el colapso de la estructura.

Los sismos fuertes que han tenido lugar hasta la fecha, han mostrado, que las estructuras de mampostería no reforzada, han sido afectadas de manera significativa, provocando pérdidas de vidas humanas, pues este sistema estructural ha presentado un comportamiento con muy poca ductilidad [2]. Esto debido a la baja resistencia a cortante y tracción que presentan este tipo de estructuras, junto con algunas deficiencias constructiva que se pueden presentar, como son: malas conexiones, diafragmas de piso excesivamente flexibles, morteros de mala calidad, etc.

Las estructuras de mampostería no reforzada son normalmente consideradas como poco adecuadas en zonas con una amenaza sísmica elevada, pues su desempeño sísmico es bastante variable. La razón de esta variabilidad, se explica a partir de la relación carga-deformación: inicialmente la mampostería es rígida, mostrando poco efecto de carga, sin embargo, una vez se alcanza la deformación pico, suele fallar de manera frágil. Considerando que no existe ningún tipo de refuerzo, la redistribución de los esfuerzos máximos no es posible y, el fallo local rápidamente se convierte en un fallo global de la estructura. Por lo que, el sistema pierde resistencia y puede colapsar [2].

Para analizar el comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería no reforzada, es indispensable tener claro el comportamiento como material compuesto (unidad-mortero) bajo diversas condiciones de solicitaciones y esfuerzos.

La mampostería presenta un comportamiento óptimo cuando está sujeta a compresión. El valor de la resistencia a compresión de la mampostería, depende de la calidad de las unidades, del mortero y de su interacción [3]. Factores tales como; el porcentaje de área perforada de las unidades (unidades huecas), la humedad, la capacidad de absorción y la adherencia con el mortero, influyen considerablemente en la resistencia de un muro de mampostería.

En cuanto al comportamiento a cortante, se puede decir que es mucho más complejo, debido a las diferentes propiedades mecánicas de los materiales constitutivos. Por lo tanto, las teorías de fallo utilizadas para materiales homogéneos no son totalmente válidas.

Diferentes tipos de fallo pueden ocurrir, dependiendo de las propiedades de los materiales y del estado de esfuerzos, principalmente de la magnitud del esfuerzo de compresión perpendicular a las juntas horizontales de mortero. La resistencia a cortante de la mampostería depende básicamente de:

- La resistencia a la adherencia y a la fricción entre las juntas de mortero y las unidades
- El nivel de los esfuerzos de compresión

Dentro de los ensayos utilizados para analizar el comportamiento de la mampostería frente acciones sísmicas, podemos distinguir dos tipos de ensayos: Tensión diagonal y por carga cíclica

2.1.1. Tensión diagonal

Existen muchas situaciones en las que un muro de mampostería se puede ver sometido a tensión diagonal [4]. Sin embargo, una de las situaciones más importantes es cuando una edificación de mampostería se ve sometida a un efecto sísmico, esto debido a la combinación

de la carga vertical a la cual se encuentra sometido el muro con la fuerza lateral producida por el sismo; Para estudiar el comportamiento de la mampostería en tensión diagonal se utiliza un ensayo de compresión diagonal. Este ensayo consiste en aplicar una compresión diagonal a un muro de dimensiones aproximadamente cuadradas. En este ensayo, en el muro se produce un estado de esfuerzos de compresión a lo largo de la diagonal (ver Figura 2.2), en la cual se aplica la carga, pero al mismo tiempo se produce un estado de esfuerzos de tensión a lo largo de la diagonal perpendicular a la que se produce la compresión. Como en el caso de la mampostería no reforzada el esfuerzo resistente a la tensión es mucho menor que el esfuerzo resistente a la compresión de la mampostería, aunque se trate de un ensayo de compresión diagonal, el modo de falla en prácticamente todos los casos es por tensión diagonal.

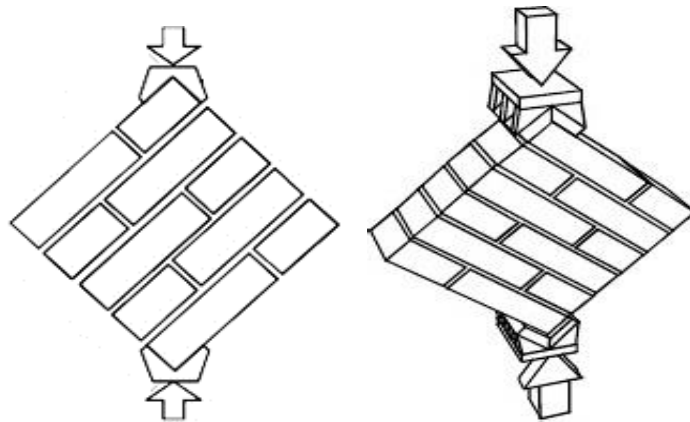


Figura 2.2. Ensayo de compresión diagonal [4]

La falla de un muro por efecto de fuerzas cortantes ocurre generalmente a través de grietas inclinadas debidas a tensiones diagonales. Estas grietas se forman generalmente a lo largo de las juntas, propiciadas por la debilidad de la unión unidad-mortero; sin embargo, para unidades con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan indistintamente unidades y mortero.

En la Figura 2.3 se muestran los principales tipos de falla de la mampostería en un ensayo de compresión diagonal. En esta figura puede verse que un primer modo de falla es cuando el agrietamiento diagonal atraviesa las unidades. Este tipo de falla normalmente se da cuando la resistencia a la tensión de las unidades es menor en relación con la resistencia de adherencia del mortero con las unidades.

El segundo modo de falla mostrado en la Figura 2.3, corresponde a aquel en que el agrietamiento se produce en forma escalonada en las juntas, y lo cual ocurre cuando la resistencia de las piezas es mayor en relación con la resistencia de adherencia del mortero

con las unidades, por lo que el agrietamiento ocurre en el elemento débil que en este caso es la junta. Este tipo de falla es muy común en mamposterías hechas con unidades refractarias. Finalmente, cuando el esfuerzo resistente a la tensión de las piezas es semejante a la adherencia entre piezas y mortero, se da un modo de falla mixto en que el agrietamiento diagonal se da tanto en las unidades como en las juntas.

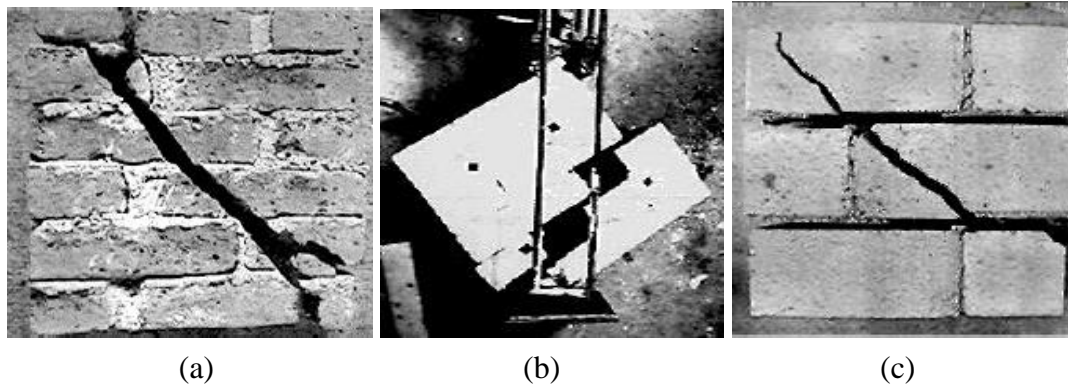


Figura 2.3. Modos de falla de ensayos de compresión diagonal [5]: a) falla por las piezas, b) falla por las juntas, c) falla mixta

2.1.2. Carga cíclica

El ensayo por carga cíclica consiste en someter un muro a una carga cíclica en dirección paralela a las juntas horizontales en uno de sus extremos. Esta carga por lo general se aplica en combinación con una carga de compresión perpendicular a las juntas horizontales (ver Figura 2.4), esto con la finalidad simular mejor las condiciones reales de los muros (sometidos a cargas de servicio) y de aumentar la fuerza de fricción entre el mortero (juntas horizontales) y las unidades, y con ello aumentar la resistencia a cortante y la capacidad de disipar energía del muro.

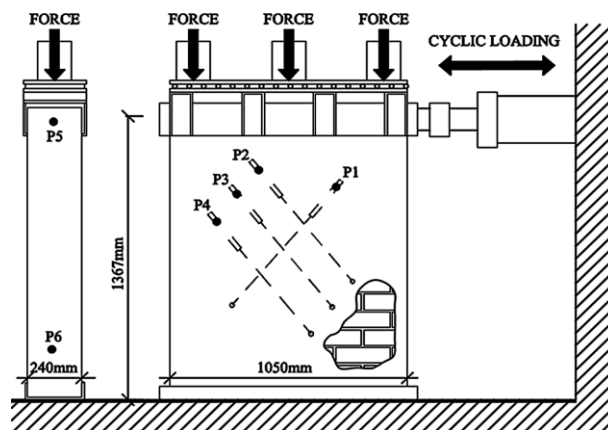


Figura 2.4. Ensayo por carga cíclica [6]

Antes del agrietamiento el comportamiento de la mampostería es esencialmente elástico y no se observa ninguna degradación considerable. Sin embargo, después del primer agrietamiento la mampostería no reforzada se caracteriza por tener una fuerte degradación de rigidez y resistencia (ver Figura 2.5). La rigidez lateral de la mampostería disminuye en la medida en la que se incrementa el número de ciclos y el nivel de deformación lateral [7].

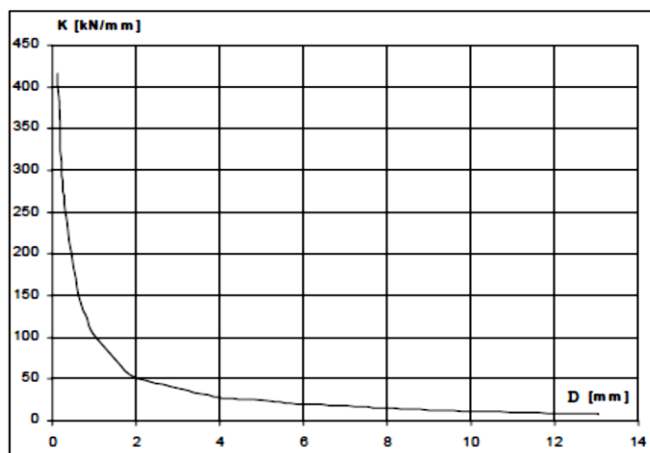


Figura 2.5. Degradación de la rigidez [7]

Además de la pérdida de rigidez lateral, el agrietamiento de la mampostería produce un estrechamiento importante de los ciclos de histéresis. Se denomina ciclos histéresis a la representación de los ciclos reversibles de carga y descarga, obtenidos a partir del comportamiento histerético de los muros sometidos a un ensayo cíclico. La Figura 2.6 muestra la relación entre la fuerza horizontal aplicada, y la deflexión en el primer nivel, de un edificio de mampostería no reforzada de dos niveles, obtenida mediante un ensayo de cargas cíclicas laterales y reversibles [7].

Básicamente lo que ocurre es que mientras se incrementa el desplazamiento lateral en una dirección se abren las grietas y cuando se descarga, o bien cuando se comienza a imponer desplazamiento en la otra dirección durante el proceso de cerrado de las grietas el muro tiene una baja rigidez, una vez que se cierran el muro incrementa su rigidez lateral [4].

La respuesta dinámica de las estructuras de mampostería no reforzada depende tanto de la resistencia, la rigidez y la ductilidad de los paneles, como del tipo de diafragma de piso, conexiones y de la magnitud de la carga vertical [2]. Esta última, proporciona una mayor capacidad de deformación después de que se produce el agrietamiento y, por consiguiente, permite que el sistema disipe cierta cantidad de energía. Por lo que la mampostería no reforzada mejora sustancialmente en el comportamiento frente a cargas cíclicas, cuando los niveles de carga vertical son moderados [8][7][9].

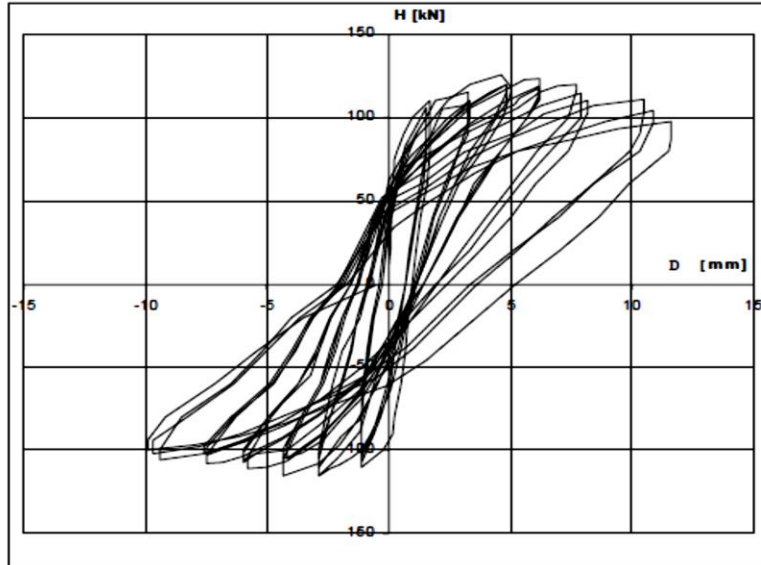


Figura 2.6. Comportamiento histerético de la mampostería no reforzada [7]

Atendiendo a la carga de compresión a la que se encuentre sometido el muro, se podrán distinguir tres tipos de fallos [2]:

1. Fallo por fricción-cortante: este tipo de fallo ocurre para esfuerzos de compresión bajos y se produce por la unión débil de las interfaces mortero-unidad, dando lugar a esfuerzos cortantes deslizantes en las juntas horizontales.
2. Fallo por tensión diagonal para esfuerzos de compresión moderados, donde las grietas se distribuyen en forma de “X” atravesando las unidades (también puede presentar los otros fallos producidos en el ensayo de tensión diagonal).
3. El fallo por flexión, la resistencia a flexión crece más rápidamente con el incremento de la carga axial de compresión que en el caso de la resistencia a cortante (por lo que a menor carga de compresión menor resistencia a flexión). El fallo por flexión depende mucho de la altura del muro, pues a mayor altura mayor posibilidad de falla por flexión. Este comienza con la formación de grietas horizontales localizadas en la parte inferior del muro, sobre la junta horizontal más cercana al apoyo inferior.

A pesar de que los muros actúan mejor a mayores cargas de compresión, no se debe aplicar una carga de compresión muy alta pues el fallo se podría producir por compresión, el cual a su vez podría producir fallos por: tracción, cortante (en el mampuesto) o flexión (dependiendo la altura del muro).

A pesar de los inconvenientes que presenta la mampostería frente a acciones sísmica y los grandes avances en las tecnologías constructivas, en países desarrollados la mayoría de edificios históricos y de viviendas corresponden a este tipo de sistema constructivo, y en países en vía de desarrollos sigue representando uno de los principales sistemas

constructivos. Por lo que, dotar a la mampostería de una mayor resistencia a tracción y cortante resulta una alternativa atractiva para la mejora de las prestaciones estructurales de estas frente acciones sísmicas. Con este fin, son varias las técnicas de refuerzo que han sido utilizadas a lo largo de la historia, entre las cuales se sitúa el refuerzo con tejidos embebidos en una matriz inorgánica de mortero, lo que se conoce como Fabric Reinforced Cementitious Matrix o FRCM, el cual será estudiado en esta tesis, por su reciente y prometedor desarrollo.

2.2. Refuerzo de mampostería con FRCM

El FRCM surge como una opción alternativa frente a la matriz orgánica del FRP. Este es un material compuesto formado por un tejido en forma de cuadrículas embebido en una matriz inorgánica de mortero. El tejido puede ser fabricado con materiales tan diversos como fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de basalto, entre otras. El principal requisito que debe cumplir este tejido es su perfecta adherencia con el mortero de la matriz del FRCM.

Es esencial entender que el FRCM aporta resistencia a tracción gracias a las fibras de los tejidos, y que estas fibras soportan únicamente las cargas que el mortero es capaz de transmitir [10]. Así pues, la transmisión de esfuerzos mortero-tejido es uno de los principales requisitos a plantearse. Otro requisito es que la malla sea químicamente estable cuando está embebida en el interior de la matriz inorgánica, asegurando su durabilidad.

Por otro lado, la adaptabilidad geométrica de la malla es de gran importancia cuando se plantea el refuerzo de estructuras con geometrías singulares. Así pues, fibras como las de carbono o vidrio ofrecerán mayor flexibilidad geométrica que los tejidos o mallas de alambres de acero. Las formas comunes de estos tejidos suelen ser unidireccionales (para flexión y tracción) o bidireccional (para flexión y/o cortante) de acuerdo con las necesidades de refuerzo.

En los materiales compuestos de matriz polimérica (FRP) las fibras se disponen en láminas unidireccionales continuas, que son fácilmente impregnables por las resinas. Sin embargo, este tipo de configuración es ineficaz cuando la matriz es un mortero de base inorgánica. Para lograr un material compuesto monolítico es necesario permitir el flujo del mortero a través del núcleo de refuerzo (ver Figura 2.7). Esto se consigue mediante el uso de tejidos, una disposición que permite la cohesión de las diferentes capas de mortero a través de las celdas que configuran la malla [10].



Figura 2.7. Colocación del FRCM [11]

Las dos principales aportaciones que realiza la matriz al material compuesto son la conexión entre el material substrato a reforzar (mampostería) y la malla, y la protección de la fibra frente a las condiciones externas (humedad, luz solar, etc.). La primera aportación es la más relevante a nivel estructural puesto que el FRCM únicamente contribuirá a soportar las cargas que la matriz sea capaz de transferir desde la superficie de la mampostería a reforzar hasta las fibras. Así pues, la adherencia de la matriz a la mampostería es otro de los principales parámetros a tener en cuenta si se pretende sacar el máximo provecho las propiedades mecánicas del FRCM a utilizar [10]

Si la adherencia matriz-mampostería no es suficiente, el fallo de la estructura reforzada suele producirse por desprendimiento (debonding) del FRCM. Por contra, si dicha adherencia es suficiente, el fallo puede ser por falta de resistencia de la mampostería que no es capaz de transmitir la carga a la matriz sin colapsar localmente en superficie. En este caso se observaría un efecto de arrancada de la capa superficial del mampuesto (peeling). Si la interface obra de mampostería-matriz funciona correctamente y la conexión matriz-fibra también, podría observarse un fallo por agotamiento de la resistencia a tracción del tejido (que no tiene por qué corresponderse con un agotamiento a tracción de todas las fibras traccionadas de la sección), sin embargo es importante señalar, que para el caso específico de la mampostería Cevallos et al. [12] ha demostrado que la fuerza del material compuesto (mortero-fibras) no es el único factor decisivo en el comportamiento de muros de mampostería, puesto que una mayor rigidez de la malla, puede llevar al fallo por desprendimiento del FRCM.

Las principales razones o ventajas que hacen a los investigadores mostrar cada vez más interés en el conocer el comportamiento del FRCM son las siguientes:

1. La naturaleza inorgánica (mortero de cal, cemento, yeso, etc.) y porosa del FRCM resulta altamente compatible con las estructuras de mampostería (sobre todo en las juntas), por lo que hay una compatibilidad de deformaciones, evitando que se generen esfuerzos por deformaciones relativas debidos a cambios térmicos o por tener rigideces muy distintas (como en el FRP).
2. Al tratarse de una tecnología basada en un ámbito inorgánico, tienen una mejor resistencia al fuego frente a la matriz orgánica de los FRPs. Esta es una gran ventaja frente al FRP que pierde sus características resistentes a temperaturas de aproximadamente 200 °C y su durabilidad se ve comprometida si se expone al sol.
3. Tiene una mejor sostenibilidad frente a la manipulación de los FRPs, pues no utiliza materiales tóxicos ni peligrosos en su aplicación, a diferencia de las resinas químicas requeridas para la adhesión del FRP
4. Aplicación simple por parte de personal de albañilería. No se requiere formación específica como para el FRP.
5. Es reversible y reciclable de forma sencilla, puesto que se trata de un composite formado por materiales reciclables. La adherencia del FRCM con la mampostería y el hormigón es suficientemente buena para la transmisión de esfuerzos, pero no tanto como para calificar el refuerzo de irreversible sin dañar la estructura original.

No obstante, en comparación con los sistemas basados en matrices orgánicas (FRPs), la solución FRCM resulta menos eficaz en términos de capacidad portante. Este rendimiento está altamente condicionado por la inferior adherencia de la matriz inorgánica, así como por la menor cantidad de fibras en la configuración tipo malla [10]. Además, también presenta menor rigidez que los refuerzos con FRP o con pletinas o viguetas de acero, mayor tiempo de espera para que el refuerzo sea efectivo (en general 28 días de curado), falta de experiencia y normativa, falta de distribuidores y falta de empresas aplicadores.

2.2.1. Acción del FRCM a cortante

Como se comentó anteriormente uno de los principales inconvenientes que presenta la mampostería frente acciones sísmicas es su baja resistencia a cortante en las juntas, pues los esfuerzos transmitidos por las cargas sísmicas que actúan paralelas a las juntas horizontales tienden a producir deslizamientos en la interacción mortero-mampuestos de las juntas, y con ello a veces el colapso total de la estructura.

Ante este fallo que puede presentar la mampostería por cortante, algunos investigadores [13][14][15][16] han puesto su interés en mitigar los daños utilizando el sistema de FRCM.

Estudios como el presentado por Babaeidarabad et al. [13] han demostrado que el refuerzo con FRCM de fibras de carbono es eficaz para aumentar la rigidez y pseudo-ductilidad (relación deformación última por cortante/deformación debida al esfuerzo cortante de fisuración) en muros de mampostería, aumentando su resistencia a cortante de entre 2.4 y 4.7 veces con relación a los muros no reforzados. Sus resultados muestran que los modos de fallo de los muros reforzados con FRCM fueron influenciados directamente por los esquemas de fortalecimiento (1 y 4 tejidos por cada lado), resultando que los muros reforzados por una sola capa de tejido de ambos lados tenía mayor pseudo-ductilidad que los reforzados por 4 capas, sin embargo, los de 4 capas presentaron mayor resistencia última a cortante. Por otro lado, Parisi et al. [15] y Yardim et al. [16] mostraron que cuando se aplica FRCM en ambas caras del muro, se consigue mayor resistencia a cortante (aproximadamente 63%) en comparación con los especímenes reforzados en una sola cara.

Balsamo et al. [14] demostraron que el reforzamiento con FRCM de fibra de vidrio y de basalto (1 tejido de cada lado) en muros de mampostería muestran un patrón de fisuras uniforme caracterizada por fisuras con una anchura pequeña en comparación con los observados en los muros no reforzados, lo que indica una mejor capacidad de disipación de energía de las muestras reforzadas (ver Figura 2. 8). Este fenómeno es también confirmado por Koutas et al. [17] y Menna et al. [18], donde el FRCM demostró ser eficaz al soportar grandes deformaciones de corte a través del desarrollo de un patrón de multifisuras y por introducir un eficiente mecanismo de transferencia de carga, mecanismo activado por la capacidad del tejido para distorsionarse a cortante, y a la vez conserva su integridad estructural.

Otros de los tipos de fallos que se pueden presentar en el comportamiento de muros de mampostería reforzados con FRCM a cortante, es el desprendimiento (debonding) del FRCM, debido a la falta de adherencia entre la interface mortero-mampostería, donde estudio como el de Yardim et al. [16] asocia el problema de debonding a la falta de una metodología de anclaje entre el FRCM y la mampostería. Sin embargo, Parisi et al. [15] presenta un sistema de refuerzo de FRCM a base de cal, donde los resultados muestran que la aplicación de anclajes induce a un aumento de la ductilidad y la resistencia a cortante, pero admite que en ninguno de los especímenes (con y sin anclaje) se observó desprendimiento prematuro del FRCM.

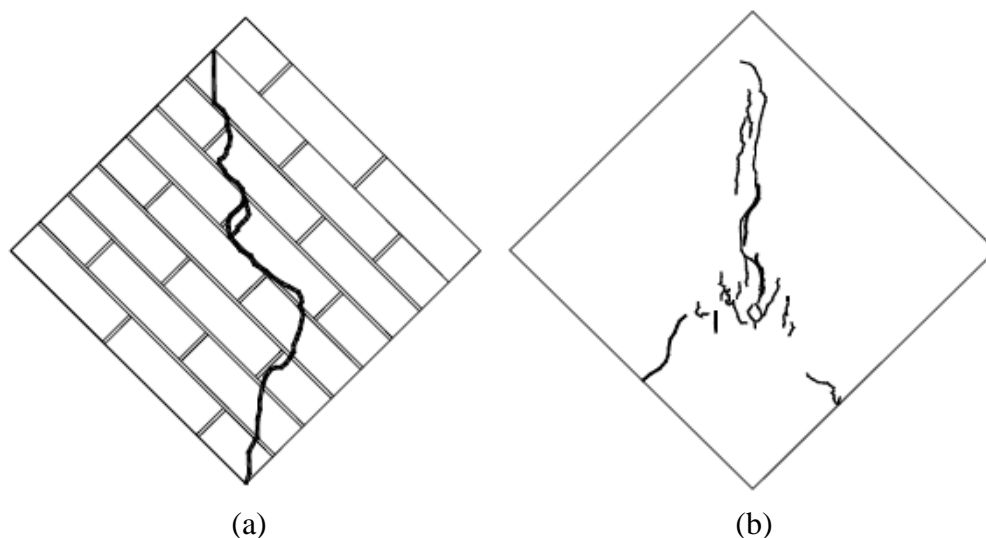


Figura 2. 8. Fisuración de muros sometidos a compresión diagonal [14]: (a) sin reforzar, (b) reforzado con FRCM

Esto demuestra un buen rendimiento de unión entre de la matriz del FRCM utilizado (a base de cal) y la mampostería (toba volcánica). Por lo que se deduce que los fallos por desprendimiento del FRCM vienen asociado al tipo de mortero utilizado y a la compatibilidad química y física de este con el mampuesto, además de la influencia de la rigidez del tejido.

2.3. Las fibras vegetales en los materiales compuestos

Para perseguir los objetivos sostenibles en la industria de la construcción y ante las ventajas económica y sostenible que podría suponer el uso las fibras vegetales como refuerzo en materiales compuestos, los investigadores se han interesado en estudiar el comportamiento de este tipo de fibras en los materiales compuestos. Las propiedades mecánicas que han mostrados fibras como el lino, cáñamo, sisal, yute, banana, entre otras, junto con su bajo costo, baja densidad, reciclabilidad, biodegradabilidad, han hecho de las fibras vegetales una potente alternativa frente a fibras muy comerciales como las de vidrio y carbono.

Las plantas que producen fibras vegetales, se clasifican en primarias y secundarias dependiendo de su utilización. Las plantas primarias son los que se cultivan por su contenido en fibra, mientras que las plantas secundarias son plantas en las que las fibras se producen como un subproducto [19]. Por otro lado, dependiendo de que parte de la planta se extraigan las fibras, estas se pueden clasificar en tres tipos:

1. Fibra de los frutos y semilla: fibras de coco, algodón y la ceiba, recogidos de las semillas o frutos.
2. Fibra de la hoja: fibras de abacá, sisal y piña, recogidas de hojas;

- Fibra del tallo: fibras de yute, lino, cáñamo, ramio, kenaf, cáñamo, bambú; extraídas del tallo de la planta

De la anterior clasificación de las fibras vegetales, las obtenidas del tallo o fibras basta, especialmente: fibras de lino, cáñamo, ramio, yute, son las que han presentado mejores propiedades mecánicas. En la Tabla 2.1 y la Tabla 2.2 [20] podemos ver una comparación entre las propiedades de las fibra naturales frente a las fibras de vidrio.

Tabla 2.1 Ventajas de las fibras naturales frente a la fibra de vidrio [20]

	Fibras Naturales (FN)	Fibras de Vidrio (FV)
Densidad	baja	el doble de FN
Costo	baja	el doble de FN
Renovable	si	no
Reciclable	si	no
Producción de energía	baja	alto
Marketing	vasto	vasto
Emisión de CO2	neutral	no-neutral
Abrasión	no	si
Riesgo químico	no	si
Residuo	biodegradable	no biodegradable

Tabla 2.2 Comparación de propiedades entre las fibras naturales y de vidrio [20][21][19]

Propiedades	Fibras de Vidrio	Cáñamo	Yute	Lino	Algodón	Sisal
Densidad (g/cm ³)	2.55	1.48	1.46	1.4	1.5-1.6	1.45
Esfuerzo de Tensión (MPa)	2400	550-900	400-800	800-1500	287-597	511-635
Módulo de Young (GPa)	73	70	10-30	60-80	5.5-12.6	9.4-22.0
Deformación pico (%)	3	1.6	1.8	1.2-1.6	3-10	2.0-2.5
Humedad (%)	-	8	12	7	8-25	11

A pesar de las numerosas ventajas que presentan las fibras vegetales frente a las fibras de vidrio (Tabla 2.1 y Tabla 2.2), en términos de capacidad resistente su uso se ve limitado por sus moderadas prestaciones mecánicas. Sin embargo, en este estudio publicado por Wambuaet al. [20], las propiedades mecánicas que presentaron los materiales compuestos (de matriz orgánica) de fibras naturales se comparan favorablemente con las propiedades correspondientes a los compuestos de fibra de vidrio, lo que sugiere que los compuestos de fibras naturales tienen el potencial de reemplazar a las de fibras de vidrio en muchas aplicaciones donde sus propiedades mecánicas se ajusten a las propiedades requeridas.

Según Pil et al. [22] la combinación de ventajas técnicas y atractivas características no técnicas (color, textura, tacto, sensación) dará lugar a un uso cada vez mayor de los compuestos de fibras vegetales en los bienes de consumo

En el campo de la ingeniería ya son numerosos los estudio que se han centrado en el desarrollo de un composite reforzado con fibras de lino para ser utilizado como refuerzo estructural, un ejemplo de ello es este estudio publicado por Huang et al. [23], donde se refuerzan vigas con FRP de fibras de lino (ver Figura 2.9), resultando un aumento en la capacidad de carga máxima entre el 15.5% y el 112.2%. Donde las vigas reforzadas con más capas de lino (6 capas) tuvieron mayor carga de rotura, ductilidad y capacidad de absorción de energía en comparación con las vigas reforzadas con menos capas y las vigas control. Por lo que este estudio sugiere al FRP de lino como un posible material refuerzo externo a considerar para adaptar y/o fortalecer estructuras deficientemente diseñadas y/o dañadas.

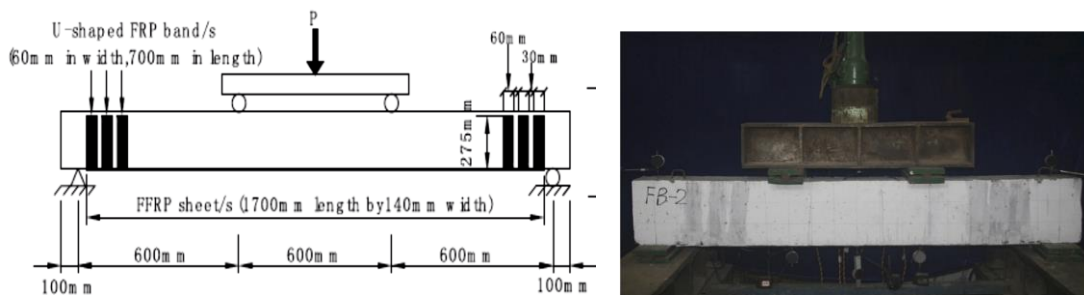


Figura 2.9. Reforzamientos de vigas con FRP de lino [23]

Por otro lado la Hibridación de fibras sintéticas con fibras naturales ha mostrado ser un método eficaz para mejorar las propiedades mecánicas de materiales compuestos de fibras naturales [24], donde a partir de un material compuesto formado por un tejido de fibras de lino y carbono se logra un material de gran resistencia y flexibilidad. Resultados parecidos obtuvo Pandey et al [25], el cual exploró la viabilidad del uso de fibras naturales en combinación con fibra de vidrio en un compuesto híbrido de poliuretano, resultando que la hibridación de lino, cáñamo y agave mejoró sus propiedades de dureza debido a la adición de las fibras de vidrio de alta resistencia.

En cuanto al comportamiento de las fibras vegetales en el FRCM ya existen numerosos artículos [26] [21] [27] [19] que analizan el comportamiento de este. Los resultados obtenidos hasta el momento demuestran el gran potencial de las fibras vegetales como refuerzo en el FRCM.

Un estudio realizado por R. S. Olivito et al. [21] presenta un comportamiento dúctil y una buena resistencia última a tracción del FRCM de fibras de lino e indican que el rendimiento

a tracción del FRCM de lino está condicionado por el ratio volumen de fibra-mortero a utilizar. Estos mismos autores [27] luego estudian los factores que interviene en el comportamientos del FRCM de fibras de lino y sisal, donde se observó que una matriz a base de cal fue capaz de almacenar energía, incluso cuando la rigidez del material compuesto se ve afectada principalmente por la rigidez de los tejidos naturales. Y que teniendo en cuenta la geometría y las propiedades físicas (la masa por unidad de área y la densidad lineal) de los tejidos, las fibras de lino proporcionan un mejor desarrollo de anclaje que las fibras de sisal y de vidrio en el FRCM. También se mostró que el factor que tuvo el mayor efecto en el desarrollo de las fisuras de FRCM con tejidos de lino y sisal fue el de volumen de fibras utilizado, concluyendo que la fracción de volumen de fibras comenzó a ser efectivo en un valor de aproximadamente el 3% (para ambos FRCM de lino y sisal).

A pesar de las altas propiedades mecánicas que pueden presentar las fibras sintéticas en comparación con las fibras vegetales, un estudio de Cevallos et al. [12], donde comparan el comportamiento a carga excéntrica de muros de mampostería reforzados con FRCM de fibras de lino con muros reforzados con FRCM de fibras de PBO, los especímenes con FRCM de PBO presentaron problemas de desprendimiento, esto debido a la mayor rigidez y menor capacidad de deformación del PBO. Sin embargo, el FRCM de fibras de lino fue capaz de liberar la tensión almacenada mediante la formación de fisuras en la matriz e impidiendo el desprendimiento, alcanzando aumentos de resistencia de 165.5% frente a 143.3% del PBO.



Figura 2. 10. Muros reforzados con FRCM de lino y PBO, sometidos a ensayos de carga excéntricas [12]

Este comportamiento fue confirmado por los mismo autores en [28], donde los autores concluyen que las fibras de PBO producen un visible fenómeno de deslaminación en los ensayos de adherencia con los mampuestos. Sin embargo, el FRCM de lino sigue mostrando una mejor adherencia con la mampostería, en comparación con el FRCM de PBO. Por lo que

los autores ven en el FRCM de fibras de lino un gran potencial para el refuerzo de estructuras de mampostería.

Junto con las fibras de lino y sisal, las fibras de cáñamo han sido una de las fibras más estudiadas como refuerzo en materiales compuesto, tanto en matrices orgánicas [22][19][29] como en matrices inorgánicas [26][19][18]. Incluso en un estudio realizados por Boccarusso et al. [30] se analiza la resistencia al fuego de FRP de fibras de cáñamo con la adicción de polifosfato de amonio, donde los autores lo sugieren como un material compuesto con moderadas resistencia al fuego.

Por otro lado, con el objetivo de emplear con mejor eficacia las fibras vegetales dentro del FRCM, Menna et al. [18] estudiaron un sistema innovador de FRCM con mallas de cáñamo impregnadas con resina epoxi (ver Figura 2.11). La impregnación de unos hilos retorcidos de cáñamo con una resina epoxi flexibles permitió un mejor explotación las propiedades a tracción de las fibras de cáñamo, y los resultados experimentales en muros de mampostería en términos de comportamiento a compresión diagonal, mostraron propiedades mecánicas mejoradas en los especímenes reforzados, donde el cortante máximo se incrementó en un factor de 2-3 en el caso de muros de mampuestos de toba volcánica y aproximadamente 5 en el caso de muros de mampuestos de arcilla, mostrando los especímenes reforzados un comportamiento dúctil.



Figura 2.11. Muros de reforzados con FRCM de mallas de cáñamo impregnadas con resina, sometidos a ensayo de compresión diagonal [18]

Considerando los buenos resultados obtenidos sobre el FRCM de fibras de lino y de cáñamo en los estudios mencionados anteriormente [26] [21] [27] [19], y debido a que han presentado mejores propiedades mecánicas que otras fibras vegetales, las fibras de lino y cáñamo se presenta como las fibras vegetales con mayor futuro en el campo de la ingeniería. Sin embargo, la gran variedad de fibras vegetales que existe en el mundo, hace que el autor se

interese por el estudio de otras fibras vegetales como la de sisal y algodón, pues su disponibilidad, propiedades mecánicas y bajo costo podrían suponer el desarrollo un material de refuerzo de elevada sostenibilidad.

2.3.1 Problemas de alcalinidad

El uso de las fibras vegetales dentro de matrices cementicias, se ve limitado por el efecto de la alta alcalinidad de las matrices más comerciales, pues estudios demuestran que la alta alcalinidad de los morteros tiende a descomponer las fibras con el tiempo. A pesar de ello, algunos investigadores se han centrado en buscar una forma de mitigar o impedir la degradación de las fibras vegetales por alcalinidad. Ardanuy et al. [31] hace una revisión a los avances dentro del campo de los compuestos a base de cemento reforzados con fibras vegetales, donde distingue dos tipos de métodos a seguir para mitigar los daños por alcalinidad del mortero:

1. Adiciones puzolánicas: directamente introducidos en la masa del cemento o aplicados a las fibras, y/o a través de curado en una atmósfera de CO₂;
2. Refinado de la fibra; con tratamientos de cornificación o tratamientos superficiales químicos.

Estos métodos han permitido obtener materiales compuestos de cemento con fibras vegetales con significativas propiedades mecánicas y una aceptable durabilidad en la última década. Aunque todavía los esfuerzos siguen centrados en mejorar aún más la durabilidad y el rendimiento mecánico de estos materiales compuestos, sin aumentar los costos de producción.

Un ejemplo de ello lo muestra Snoeck et al. [26], donde sus resultados mostraron que las propiedades de una matriz a base de cemento reforzada con fibras vegetales se mejoraron tratando químicamente (con 2% (m/m) [NaOH]) las fibras naturales, evitando esto la degradación por el ambiente alcalino del mortero.

Por otro lado Olivito et al. [21] han realizado sus estudios utilizando una matriz de baja alcalinidad de mortero a base de cal (NLM) y una matriz de grout a base de cal mezclada con filler carbonato y puzolana pura (NLG), donde la baja alcalinidad de la matriz NLG, y la presencia de filler carbonato y puzolana pura con un alto contenido de sílice reactiva, hace a esta matriz muy adecuada para su uso en FRCM de fibras vegetales como refuerzo en estructuras de mampostería.

Otro tratamiento utilizado para evitar la degradación de las fibras es el recubrimiento de fibras con una resina [32].

El principal problema que presenta el recubrimiento con resina es que afecta la sostenibilidad (aumentando su costo y exhibiendo toxicidad) de las fibras vegetales. Sin embargo, hoy en día, el recubrimiento en mallas comerciales para usar en los compuestos FRCM es una técnica ampliamente utilizada. En algunos casos para evita la degradación de la fibra dentro de la matriz cementosa [33] y en otros casos mejora las propiedades mecánicas y la unión de las mallas con la matriz [34][35].

Para las mallas de fibras vegetales, el uso de un recubrimiento se justifica por la sustitución de las fibras sintéticas, la protección de la fibra frente al ambiente agresivo de la matriz cementicia y la mejora de la interacción mecánica entre malla-matriz. Aunque el uso de resina para recubrir las fibras no es amigable con el medio ambiente, en la actualidad muchas de las mallas comerciales de fibras sintéticas vienen recubierta con resina para mejorar la adherencia con la matriz, por lo que la sustitución propuesta de las fibras sintéticas por fibras vegetales es un paso adelante en esta línea.

Estos métodos de tratamientos frente a la alcalinidad de la matriz inorgánica, han hecho posible el desarrollo de estudios que han permitido valorar las prestaciones del FRCM de fibras vegetales.

2.4. Modelos analíticos de muros de mampostería reforzados y sin reforzar con FRCM

2.4.1. Modelos analíticos de muros de mampostería

La creciente preocupación por la preservación de construcciones antiguas y amplio uso de mampostería en la construcción de obras civiles, ha llevado a una gran innovación en el desarrollo de técnicas específicas para estudiar estructuras hechas con estos materiales.

Los métodos analíticos y numéricos confiables y precisos revelan ser fundamentales en los cálculos de ingeniería y en el apoyo a la definición de reglas de diseño racional. Por lo que uno de los objetivos de esta tesis es el desarrollo de modelos analíticos y numéricos capaces de reproducir el comportamiento obtenido en la campaña experimental.

Ya son varios los estudios que han presentado modelos analíticos capaces de reproducir el comportamiento de muros de mampostería, uno de los procedimientos más utilizado ha sido el presentado en [36]. Este identifica 4 tipos de fallos por cortante en muros de mampostería, los cuales son validados por los resultados experimentales. Estos fallos por cortantes identificados en muros de mampostería ensayados a compresión diagonal son definidos como

fallo por deslizamiento de corte, fricción de corte, tensión diagonal y aplastamiento en la punta de aplicación de carga.

Un estudio presentado por Silva et al. [37] utilizó el modelo probabilístico de simulación de Monte Carlo (MCS) para la evaluación de la resistencia a cortante en el plano de muros de mampostería de hormigón y arcilla reforzados y sin reforzar. Este modelo se modificó y calibró en función de los resultados experimentales presentados en este estudio. Donde el modelo analítico propuesto fue capaz de predecir con precisión los modos de fallo y la resistencia cortante en el plano dentro de un intervalo de confianza del 95%.

Por otro lado Mebarki [38] presenta un método semi-empírico para estimar la resistencia lateral en muros de mampostería confinada, donde propone la superficie de fallo en la diagonal y considera la capacidad resistente de la mampostería y los castillos. La capacidad del método es mostrada con los resultados de muros elaborados con diferentes tipos de unidades de mampostería, para los que se estimaron valores de resistencia lateral del 73 % al 113 % respecto de la resistencia experimental bajo cargas laterales cíclicas y monótonas.

2.4.2. Modelos analíticos de muros reforzados con FRCM

En el caso de muros reforzados con FRCM el desarrollo de modelos analíticos capaces de reproducir con exactitud el comportamiento de estos a cortante ha estado muy limitado por la dificultad de reproducir el comportamiento de adherencia entre FRCM y los muros.

A pesar de ello, D'Antino et al. [39] propuso un procedimiento analítico para calcular el momento máximo de flexión fuera del plano en muros de mampostería reforzados con FRCM. El procedimiento se basó en condiciones de equilibrio simple, y considera las características mecánicas y de unión del FRCM empleado (obtenido de ensayos de tracción y adherencia). La precisión del procedimiento propuesto se evaluó por comparación entre 63 disposiciones analíticas y los momentos máximos de flexión correspondientes a muros de mampostería reforzadas con FRCM recogidas de la literatura. Los resultados mostraron que el nuevo procedimiento proporciona una estimación precisa del momento flector máximo con una ratio promedio de 0.96 (resultados experimentales/resultados analíticos).

Otro estudio publicado por Babaeidarabad et al. [36] utiliza la metodología propuesta por ACI 549 [40] basada en la formulación clásica de resistencia a cortante para analizar el comportamiento de muros reforzados con FRCM de carbono. Esta es una de la metodología más utilizada, pues ha demostrado ser eficaz para predecir la resistencia a cortante de muros de mampostería. Ismail et al.[41] utilizó también esta metodología para analizar muros reforzados con FRCM de vidrio, basalto y carbono. En el caso de los muros reforzados con

FRCM de vidrio y basalto el modelo analítico presento una resistencia a cortante conservadora, donde la relación entre los valores predichos y experimentales fue de 0.38 a 0.71. Sin embargo, en el caso de muros reforzados con FRCM de carbono, la resistencia a cortante fue conservadora solo cuando no se verificó la limitación de aplastamiento.

Por otro lado Cascardi et al. [42] propuso un modelo analítico para predecir la resistencia a cortante de la mampostería reforzada con FRM mediante el uso del enfoque de red neuronal artificial (ANN), la cual está inspirada en la arquitectura del sistema nervioso humano que consiste en un gran número de neuronas que son responsables del aprendizaje y la toma de decisiones. En esta se propone una matriz de ponderación de valor numérico y un sesgo para cada neurona en la que se resuelven diferentes fórmulas analíticas (fórmula de transformación) para crear ajustes en la matriz. Para la calibración del modelo se seleccionaron y analizaron campañas experimentales de ensayos de compresión diagonal llevadas a cabo en muros reforzados con FRM. La base de datos seleccionada incluye una variedad suficiente de tipos de mampostería (material y textura), así como del tipo de refuerzo, referidos a ambas fibras (vidrio, carbono, acero, basalto, PBO, etc.) y matriz (cemento, cal, mortero hidráulico). La base de datos desarrollada y el análisis posterior permitieron proporcionar un modelo eficaz para predecir la resistencia a cortante en el plano de muros de mampostería reforzados por sistemas de FRCM.

2.5. Modelos numéricos de muros de mampostería reforzados y sin reforzar con FRCM

2.5.1. Modelos numéricos de muros de mampostería

El comportamiento mecánico de la mampostería es mucho más complejo que el hormigón, en gran parte porque la mampostería consta de dos componentes distintos, estos son las unidades de mampostería y las juntas de mortero. Como resultado, las estructuras de mampostería no son homogéneas y contienen muchas discontinuidades. El grado de complejidad aumenta aún más por las variaciones inherentes en los materiales y las variaciones en la mano de obra. Por lo que reproducir el comportamiento real de este tipo de estructuras a través de un modelo numérico resulta una tarea compleja.

Las estrategias de modelado de mampostería con elementos finitos se pueden clasificar en tres categorías [43]: microescala, mesoescala y macroescala.

Macro-escala: Este se refiere a todos los componentes de la mampostería como un continuo único en el que los elementos sólidos o elementos de cubierta se adoptan ampliamente [44]. Los materiales constitutivos son inicialmente simplificados para ser homogéneo e isotrópico.

Debido a la reducción del costo computacional y a los parámetros de los materiales, este modelo es comúnmente utilizado para el análisis estructural a gran escala.

Micro-escala: A diferencia del modelado a escala macro, las unidades de mampostería, las juntas de mortero y las interfaces unidad-mortero se consideran por separado en este tipo de modelado. En este caso, las unidades de mampostería y el mortero se modelan con un grosor real y se asignan las propiedades correspondientes del material [45].

Meso-escala: Los modelos de mesoescala se denominan habitualmente microescala simplificada. Al igual que los modelos de microescala, pueden proporcionar una perspectiva de la evolución del daño en la mampostería. El modelado en mesoescala solo permite que las grietas se inicien en las juntas de mortero y se propaguen a lo largo del patrón de líneas bien definido. Este método de modelado se basa en observaciones de la prueba experimental de mampostería y han demostrado ser efectivo para modelar algunos elementos grandes de la construcción de mampostería [46]. Estos modelos normalmente usan contacto o algunos elementos de propósito especial (elementos de interfaz, resortes, etc.) para reemplazar el mortero [46][43].

Por otro lado un estudio presentado por Aref y Dolatshahi [47] describe una estrategia de modelado que implica el desarrollo de un modelo de material constitutivo y su implementación en una subrutina pre-definida. En este se realizaron varias simulaciones para evaluar la exactitud y la solidez del modelo del material derivado y su implementación tanto a nivel de elemento como de estructura. Esta estrategia de modelado ofrece una demanda computacional eficiente y relativamente reducida, con ello una solución a los problemas de convergencia expresado por otros investigadores.

2.5.2. Modelos numéricos de muros reforzados con FRCM

Uno de los principales problemas que presenta el sistema de FRCM es la interacción malla-matriz. Pues los problemas de deslizamientos entre la malla y la matriz por falta de fricción son uno de los fallos más comunes en estos tipos de compuestos, por lo que el uso de los modelos comúnmente utilizados para simular el hormigón armado, está limitado por estos tipos de fallos.

A pesar de lo anterior, hay estudios como el presentado por Donnini et al. [48] que utiliza un modelo variacional para obtener información sobre el comportamiento mecánico de los sistemas de FRCM, en particular en la interfaz entre el mechon y la matriz. Los modelos numéricos presentados en este estudio fueron capaces de reproducir el comportamiento del FRCM durante ensayos de adherencia en el caso de un refuerzo con tejidos constituido por

hilos sin revestimiento de resina. Este modelo también permitió establecer una longitud de unión efectiva de aproximadamente 200 mm, pues la carga máxima no aumenta al aumentar más la longitud de adherencia entre malla y matriz. Sin embargo, los sistemas de FRCM reforzados con hilos de carbono revestidos con resina experimentaron un comportamiento diferente. La carga aumentó al aumentar la longitud de la unión, debido a la elevada fricción desarrollada en la fase de deslizamiento.

Por otro lado, un estudio presentado por Grande y Milani [49] presenta un estudio numérico dedicado a investigar la influencia de diferentes fenómenos sobre el mecanismo resistente de los sistemas de FRCM. Este estudio presta especial atención al daño progresivo de la capa de mortero superior que afecta (capa que no está en contacto con el elemento a reforzar) tanto al mecanismo local de transferencia de tensión de corte entre el refuerzo y la capa de mortero superior como a la respuesta global del sistema de refuerzo. Para este objetivo, los autores propusieron un modelo de resorte simple pero efectivo donde cada componente del sistema de FRCM (mortero, tejido, soporte e interfaz de tejido-mortero) se modela a lo largo de resortes con comportamiento lineal y no lineal.

Luego otro estudio de Grande et al. [50] explica la interacción entre el refuerzo y la matriz de mortero en el nivel de la interfaz, al considerar los fenómenos de desunión y fallo de tracción del mortero, que generalmente afectan el mecanismo resistente de los FRCM. Sin embargo, este modelo presenta la dificultad de que es necesario conocer la energía de la fractura, por lo que se deben realizar pruebas experimentales capaces de proporcionar esta información antes de usar el modelo.

También Carozzi et al. [51] presenta dos modelos numéricos útiles para reproducir la interfaz tejido-mortero-ladrillo. En el primer modelo, basado en un enfoque analítico-numérico, solo el compuesto de FRCM se considera y modela por medio de elementos finitos 1D que interactúan con el mortero por medio de interfaces que muestran un comportamiento no lineal de tensión-deslizamiento deducido de los datos experimentales. El segundo modelo es un enfoque de elementos finitos totalmente en 3D, basado en Programación cuadrática secuencial y utiliza elementos rígidos de 8 nodos interconectados por interfaces inelásticas que muestran un ablandamiento. Al final se demostró que ambos modelos fueron capaces de simular completamente los ensayos experimentales.

En otro estudio presentado por Carloni et al. [52] se utilizaron también modelos tridimensionales no lineales para estudiar el comportamiento de adherencia de FRCM de PBO con el hormigón. El enfoque numérico asumió leyes constitutivas lineales para los materiales y leyes no lineales de contacto para las diferentes interfaces consideradas. El

modelo numérico desarrollado en este documento es capaz de reproducir diferentes modos de falla observados en los ensayos de adherencia de la interfaz hormigón-FRCM.

En ese mismo sentido Bertolesi et al. [53] presentaron dos modelos numéricos novedosos para el análisis de muros de mampostería reforzados con FRCM. El primer enfoque es un modelo de homogeneización, donde el ensamblaje heterogéneo de mortero y ladrillos se sustituye a nivel estructural, a través de una solución simplificada adecuada del problema de homogeneización en la celda unitaria, con un material homogeneizado que exhibe un comportamiento ortotrópico y se reblandece tanto a tracción como a compresión. El segundo enfoque numérico es una discretización heterogénea completa de un muro de mampostería reforzada con FRCM. Donde las juntas y ladrillos se discretizaron por medio de ocho elementos cuadriláteros nodulados que obedecen a un modelo de material de daño plástico del hormigón disponible en Abaqus [54], asumiendo propiedades mecánicas distintas para el mortero y las unidades. El sistema FRCM se ha modelado de manera similar, es decir, por medio del modelo de daño plástico del hormigón, ocho elementos con muescas que representan la matriz cementicia y con una malla interna (tejido) constituida por los elementos elasto-frágiles tipo “truss”. En esta se asumió la unión perfecta entre la matriz y el tejido en aras de la simplicidad. Se encontraron satisfactoriamente las curvas globales de fuerza-desplazamiento y los patrones de fisuras, con una ligera ventaja a favor del enfoque heterogéneo. No obstante, la eficiencia numérica del enfoque homogeneizado resultó ser mucho más alta, lo que lo hace particularmente adecuado para el análisis de estructuras completas y muros a gran escala.

A pesar de los numerosos estudios destinados a modelar muros reforzados con FRCM, no se tiene registros de modelos de muros reforzados con FRCM sometidos a carga cíclica, y muros reforzados con FRCM de fibras vegetales. Por lo que otro de los objetivos de esta tesis es desarrollar herramientas de cálculos analíticas y numéricas capaces de reproducir el comportamiento experimental de muros reforzados con FRCM de fibras vegetales sometidos a carga cíclica.

Capítulo III. Caracterización de fibras vegetales y elaboración de mallas

3.1. Introducción

Si bien las fibras vegetales representan una opción sostenible frente a las fibras sintéticas, la gran variedad de fibras que existen en el mundo hacen necesario determinar e identificar las fibras con las propiedades mecánicas que más se ajusten a las necesidades (resistencia mecánica y capacidad de deformación) del FRCM. Así como también asegurar su efectividad dentro de la matriz, pues es bien conocido que debido al origen orgánico de las fibras estas se ven afectada por el ambiente alcalino y los ciclos de humedad que presentan las matrices cementicias.

Con el objetivo de conocer el comportamiento de los FRCM de fibras vegetales y luego aplicarlos en muros de mampostería, se diseñaron y elaboraron mallas con hilos de fibras vegetales. Para mejorar las prestaciones mecánicas y evitar su degradación dentro de la matriz cementicia, estas fueron recubiertas con dos tipos de resina (epoxi y poliéster), para evaluar la influencia de estas en las propiedades mecánicas de los hilos.

En este capítulo se describe los métodos y materiales utilizados para la caracterización de los hilos de fibras vegetales, y se presentan y analizan los resultados obtenidos de ensayos de tracción, para finalizar presentando mallas de fibras vegetales con sus propiedades definidas experimentalmente.

3.2. Materiales

3.2.1 Hilos y mechones

Se utilizaron hilos comerciales de diferentes tipos de fibras vegetales (cáñamo, lino, sisal y algodón), y mechones de mallas comerciales de fibras sintéticas (basalto, carbono y vidrio), para poder comparar el comportamiento de las fibras vegetales con las fibras sintéticas. La nomenclatura, espesor y densidad lineal se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Propiedades de los hilos

Propiedades	Cáñamo			Lino	Sisal		Algodón		Fibras Sintéticas		
Nomenclatura	H1	H2	H3	F	S1	S2	C1	C2	B	C_b	G
Espesor (mm)	0.5	1.2	2.5	0.5	2	2.5	1.5	3	0.16	0.09	0.18
Densidad lineal (g/m)	0.4	0.67	4.26	0.43	2.28	3.63	1.2	3.4	2.23	0.86	2.63
Densidad volumétrica (g/cm ³)	2.04	0.5	0.44	2.17	0.46	0.74	0.67	0.48	2.8	1.82	2.5
Estructura	Cableado			Cableado	Cableado	Trenzado	Trenzado		-		

B: Basalto, C_b: Carbono, G_{AR}: Vidrio álcali resistente, B_{AR}: Basalto álcali resistente

Los espesores fueron suministrados por los fabricantes y confirmado con un pie de rey digital de una precisión de 0.01. Pero en caso de la densidad lineal y volumétrica de los hilos de fibras vegetales, estas fueron determinadas a partir de pesar los especímenes de hilos en una báscula de precisión (ver apartado 3.3).

3.2.2 Resinas

Se utilizaron dos tipos de resina (ver Tabla 3.2) para comparar la influencia de estas en los hilos de fibras vegetales, y en la interacción de estos con las matrices cementicias utilizadas en el capítulo 4.

Tabla 3.2 Propiedades de las resinas

Propiedades	Epoxi	Poliéster	Poliéster flexible
Densidad (g/cm ³):	1.05	-	1.2
Resistencia a Tracción (Mpa):	22.9 ± 4	69.6	15
Elongación (%):	18.2 ± 7	1.9	50
Resistencia a Flexión (Mpa):	No rompe	138.6	10
Módulo de Flexión (Mpa):	233	4095	220

Se utilizó una resina epoxi para laminación de baja viscosidad y alta adhesión, y una resina de poliéster, el cual era una mezcla de un poliéster estándar para producir laminados de FRP

y un poliéster insaturado flexible (Tabla 3.2), de baja viscosidad y baja reactividad, incluido para reducir la viscosidad del poliéster estándar y el aporte de rigidez de la resina a los hilos. Estos se mezclaron en una proporción del 50%. Las propiedades mecánicas de estas resinas proporcionada por los fabricantes se presentan en la Tabla 3.2.

3.3. Cuantificación de resina aplicada

Para determinar las densidades y la cantidad de resina aplicada en los diferentes tipos de hilos de fibras vegetales, se cortaron hilos de 400 mm de cada tipo de hilo, unos fueron recubiertos con epoxi, otros con poliéster y otros quedaron sin recubrir por resina. Estos fueron recubiertos de forma manual con un pincel, de forma que los hilos estuvieran estirado y anclado en sus extremos, y a una cota superior de la base del molde donde eran impregnados, para así evitar el exceso de resina.

Luego de 1 día de curado los hilos con resina se pesaron en una báscula de precisión. Esto con el objetivo de determinar su densidad lineal, y calcular la cantidad de resina aplicada por la longitud del hilo, y así también poder estimar la cantidad de resina necesaria para el recubrimiento de las mallas presentadas más adelante en el apartado 3.6. Estos resultados se muestran en la Tabla 3.3 (en los anexos A se explica de manera más detallada la forma de cálculo).

Tabla 3.3 Propiedades de los hilos y cuantificación de la resina

Propiedades	Cáñamo			Lino	Sisal		Algodón	
	H ₁	H ₂	H ₃	F	S ₁	S ₂	C ₁	C ₂
Muestra								
Densidad linear hilo + epoxi (g/m)	0.89	2.21	8.32	0.92	6.13	8.14	4.13	9.00
Epoxi/longitud de hilo (g/m)	0.50	1.54	4.05	0.50	3.85	4.51	2.93	5.60
Densidad linear hilo + poliéster (g/m)	1.18	-	-	1.28	-	9.36	4.70	-
Poliéster/longitud de hilo (g/m)	0.78	-	-	0.85	-	5.73	3.50	-

Comparando los hilos recubiertos con epoxi con los hilos recubiertos con poliéster, se observa que los hilos con poliéster tienen un mayor peso de resina. Esto se puede deber principalmente a la mayor densidad del poliéster en comparación con el epoxi utilizado (ver Tabla 3.2).

3.4. Preparación de los especímenes y configuración del ensayo a tracción

Para estudiar la respuesta mecánica bajo esfuerzos de tracción de los diferentes hilos, a los hilos recubiertos y sin recubrir con resina se le fabricó una lámina de FRP de vidrio en los

extremos. Estas láminas de FRP de vidrio se usaron como la superficies de sujeción de 20 mm de ancho y 40 mm de largo, para asegurar una transmisión de tensión correcta desde las pinzas mecánica a los hilos (Figura 3.1)

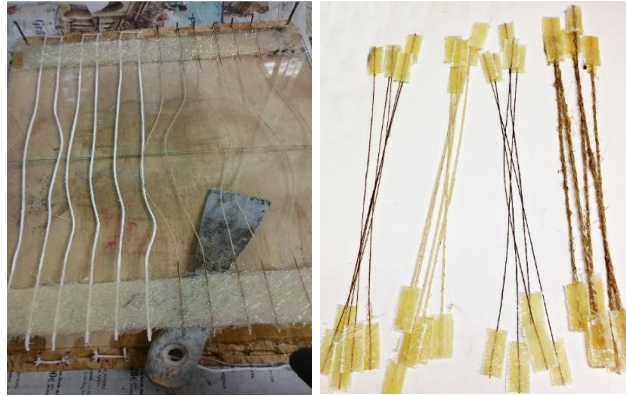


Figura 3.1. Preparación de especímenes de hilos

Las muestras de hilos, con y sin resina se ensayaron según el código EN ISO 13934-1/2 [55], pero se adaptaron a los requisitos particulares de este estudio. Estos se ensayaron en una prensa electromecánica MTS Insight con una capacidad de carga máxima de 10 KN. Los especímenes de hilos con una longitud libre de 300 mm, fueron sometidos a una precarga de 5 N antes del ensayo para asegurar la alineación de la fibra y tenerla suficientemente recta para instalar el extensómetro de 25 mm de rango, usado para medir las deformaciones en una longitud inicial de 50 mm. La velocidad de ensayo utilizada fue de 5 mm/min.

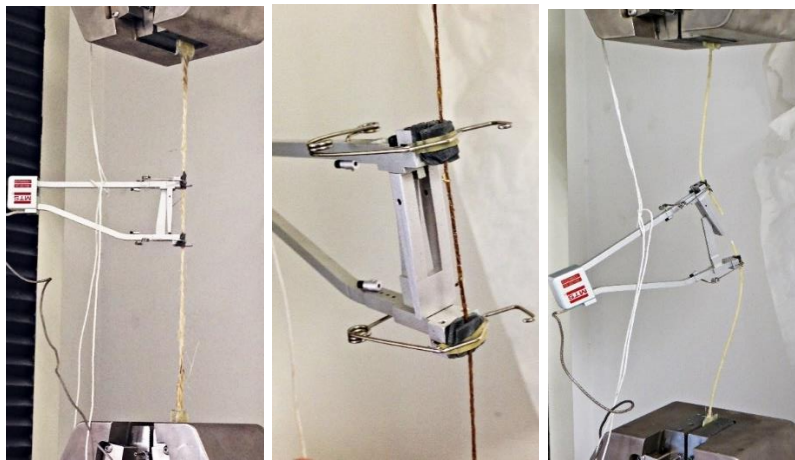


Figura 3.2. Configuración de ensayo a tracción de los hilos

3.5. Resultados y discusiones

Los resultados de los ensayos a tracción de los especímenes de hilos mencionados anteriormente se muestran en la Tabla 3.4. Estos fueron útiles para analizar el efecto de las resinas en la respuesta mecánica de los hilos de fibras vegetales.

Tabla 3.4 Resultados de ensayo a tracción de los hilos

	No. Ensayo	M	A _h (mm ²)	F _u (N)	σ _{h,u} (MPa)	E _h (MPa)	ε _{h,peak} (%)
Cáñamo	Sin Resina	H ₁	0.20	58.00	295.54 (11%)	26.33 (4%)	1.03 (15%)
		H ₂	1.13	111.80	98.90 (13%)	6.08 (10%)	1.18 (28%)
		H ₃	4.91	551.80	112.47 (13%)	4.75 (29%)	2.85 (17%)
	Epoxi	H ₁	0.20	102.20	520.76 (7%)	38.74 (6%)	1.30 (14%)
		H ₂	1.13	168.80	149.33 (12%)	8.61 (6%)	1.74 (21%)
		H ₃	4.91	692.40	141.13 (2%)	8.59 (8%)	1.68 (9%)
Poliéster	H ₁	0.20	106.80	544.20 (7%)	50.58 (15%)	0.98 (14%)	
Lino	Sin Resina	F	0.20	81.80	416.82 (17%)	24.98 (8%)	1.65 (18%)
	Epoxi	F	0.20	123.80	630.83 (9%)	36.01 (12%)	1.66 (11%)
	Poliéster	F	0.20	101.41	516.72 (6%)	37.95 (10%)	1.29 (12%)
Sisal	Sin Resina	S ₁	3.14	276.00	87.90 (16%)	3.88 (9%)	2.29 (20%)
		S ₂	4.91	475.20	96.86 (9%)	3.75 (6%)	3.01 (11%)
	Epoxi	S ₁	3.14	331.40	105.54 (19%)	4.70 (8%)	2.06 (19%)
		S ₂	4.91	546.80	111.45 (8%)	4.87 (12%)	2.15 (8%)
	Poliéster	S ₂	4.91	453.00	92.33 (12%)	3.78 (8%)	2.61 (5%)
Algodón	Sin Resina	C ₁	1.77	95.20	53.90 (1%)	0.53 (6%)	10.19 (5%)
		C ₂	7.07	654.20	92.60 (1%)	0.54 (2%)	22.77 (14%)
	Epoxi	C ₁	1.77	162.40	91.95 (1%)	0.93 (4%)	7.81 (5%)
		C ₂	7.07	634.40	89.79 (2%)	0.60 (2%)	17.52 (8%)
	Poliéster	C ₁	1.77	145.60	82.43 (6%)	0.88 (2%)	7.13 (12%)
Sintética	Basalto	B	0.80	607.11	763.66 (6%)	87.81 (3%)	1,01 (4%)
	Carbono	C _b	0.47	900.40	1915.74 (4%)	235.69 (7%)	1.02 (9%)
	Vidrio	G	1.05	708.00	674.29 (8%)	61.25 (2%)	1.32 (6%)

(%) = Coeficiente de Variación

La Tabla 3.4 muestran los valores promedios de la resistencia a la tracción ($\sigma_{h,u}$), deformación pico ($\epsilon_{h,peak}$) y el módulo de elasticidad resultantes de los hilos sometidos a ensayo de tracción (E_h). Las tensiones se calcularon teniendo en cuenta los espesores del hilo y mechones suministrados por los fabricantes (ver Tabla 3.1 y anexo A). El módulo de

elasticidad se calculó considerando la parte lineal del diagrama de esfuerzo-deformación (Figura 3.4 y 3.5).

Los resultados presentados en la Tabla 3.4 muestran que de las de fibras vegetales sin resina la que presentó la mayor resistencia fue el lino, seguido del cáñamo, el sisal y el algodón. El módulo de elasticidad del hilo de cáñamo es ligeramente más alto que el del hilo de lino, pero estos dos son significativamente más altos que el módulo de elasticidad de los hilos de sisal y algodón. Además, se puede observar que el hilo con mayor capacidad de elongación es el algodón, seguido del sisal, lino y cáñamo.

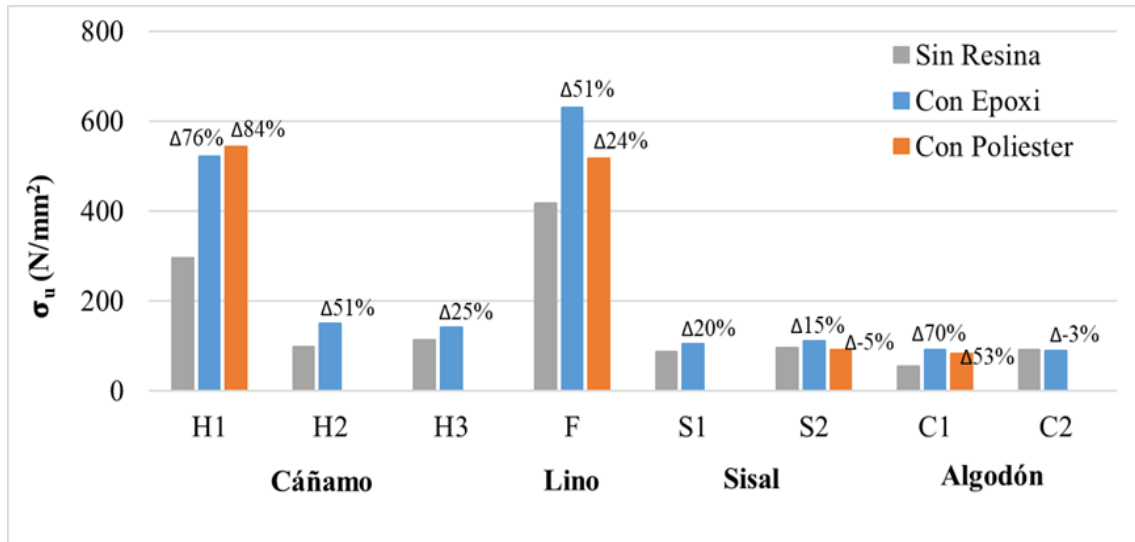
En el caso de los hilos de la misma fibra, pero distintos espesores, se observa una reducción de resistencia a tracción y módulos de elasticidad en los hilos de cáñamo, esto debido a que el aumento de sección podría provocar un aumento de la discontinuidad de las fibras en la estructura interna de estos hilos. En cambio, en el caso de los hilos de sisal y algodón se observa un aumento de la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad, esto quizás debido a la estructura trenzada de los hilos S₂, C₁ y C₂.

Comparando los resultados obtenidos de los hilos de fibras vegetales con los obtenidos por los mechones de fibras sintética se puede ver una resistencia a tracción y módulo de elasticidad superior en el caso las fibras sintéticas. Sin embargo, el objetivo de este estudio es elaborar mechones con los hilos de fibras vegetales que puedan alcanzar niveles de cargas comparables a los mechones de fibras sintética, debido al bajo costo, baja densidad y mayor sostenibilidad que representan las fibras vegetales.

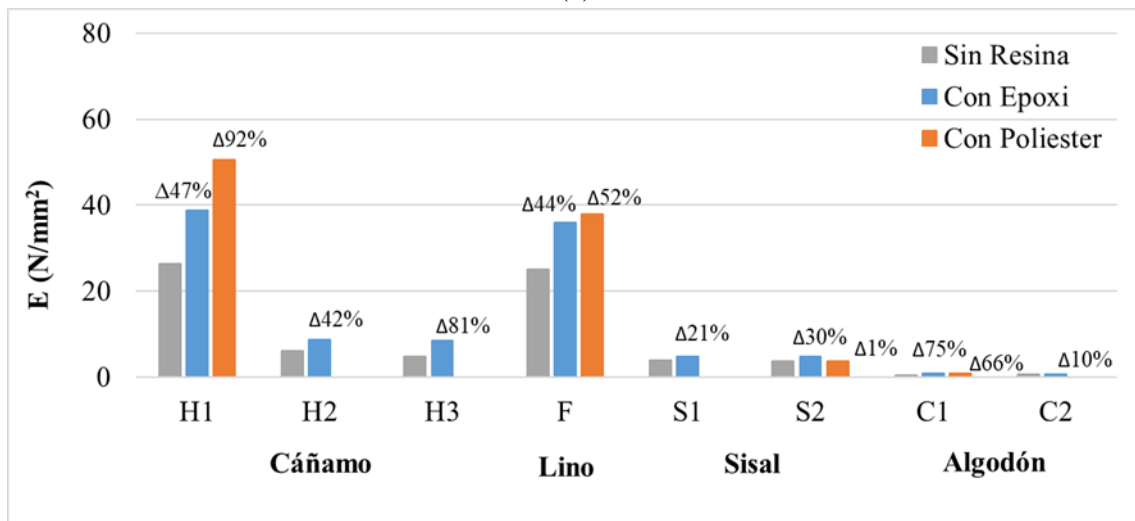
Los resultados presentados en la Tabla 3.4 muestran que el recubrimiento de los hilos aumento su resistencia a la tracción (excepto en el caso del hilo de sisal de 2.5 mm impregnados con poliéster y el de algodón de 3mm) y su rigidez.

En la Figura 3.3 se muestran los niveles tensión y rigidez alcanzados por los diferentes hilos, así como los porcentajes de aumento de la resistencia a la tracción y rigidez debido al recubrimiento con resina.

De los hilos de fibras vegetales el que fue más afectado por el recubrimiento con resina fue el hilo de cáñamo con poliéster, que alcanzó el 84% de aumento de la resistencia a la tracción y un aumento de 92% del módulo de Young. Se observa una tendencia similar para los hilos de cáñamo con epoxi (76 y 47% de aumento de la resistencia a la tracción y el módulo de Young, respectivamente).



(a)



(b)

Figura 3.3. Influencia de las resinas en las propiedades mecánicas de los hilos: (a) Tensión Máxima, (b) Módulo de elasticidad

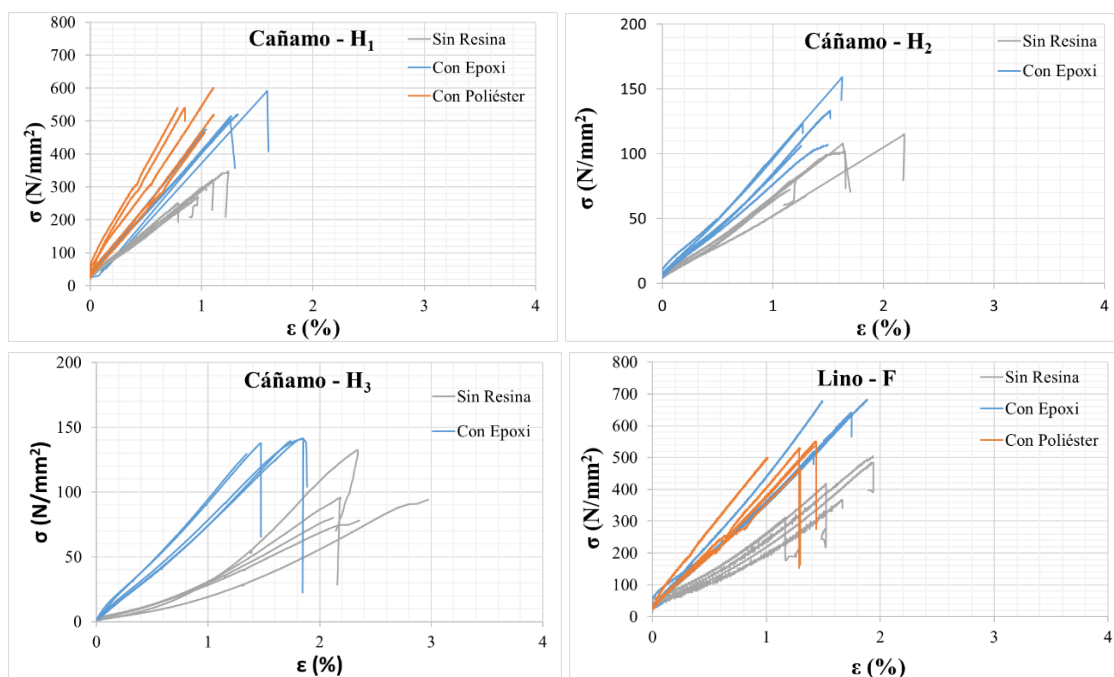
Sin embargo, la resistencia a la tracción de los hilos de sisal parece disminuir cuando estos son revestidos con poliéster, y el módulo de elasticidad mostró un ligero aumento (1%) en este caso. Por el contrario, tanto la resistencia a tracción como el módulo de elasticidad aumentaron cuando los hilos de sisal se impregnaron con epoxi (15 y 30 % respectivamente). Teniendo en cuenta que el sisal es uno de los hilos con mayor diámetro (2.5 mm), es más difícil que la resina penetre en la estructura interna de estos hilos, por lo que se puede asumir

que la poca influencia del poliéster en las propiedades mecánicas de los hilos de sisal se debe a la mayor viscosidad del poliéster frente a la resina epoxi utilizada.

En caso de la reducción de la resistencia a tracción de los hilos de algodón 3 mm, esto se puede deber también a la incapacidad de la resina de penetrar por toda la estructura interna del hilo, por su gran espesor, lo cual podría causar discontinuidades de rigidez en su estructura interna, incitando de esta manera la rotura.

Por lo tanto, se puede decir que la influencia de la resina en la respuesta mecánica de los hilos de fibras vegetales depende principalmente de la capacidad de la resina para penetrar en la estructura interna del hilo, que a su vez depende de la estructura y el diámetro del hilo.

Las Figura 3.4 y 3.5 muestran los diagramas de esfuerzo-deformación para los hilos recubiertos y no recubiertos con resina. Estos gráficos ayudan a comprender los resultados presentados en la Tabla 3.4 y hacen evidente la influencia del revestimiento con resina en la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad de los hilos de fibras vegetales.



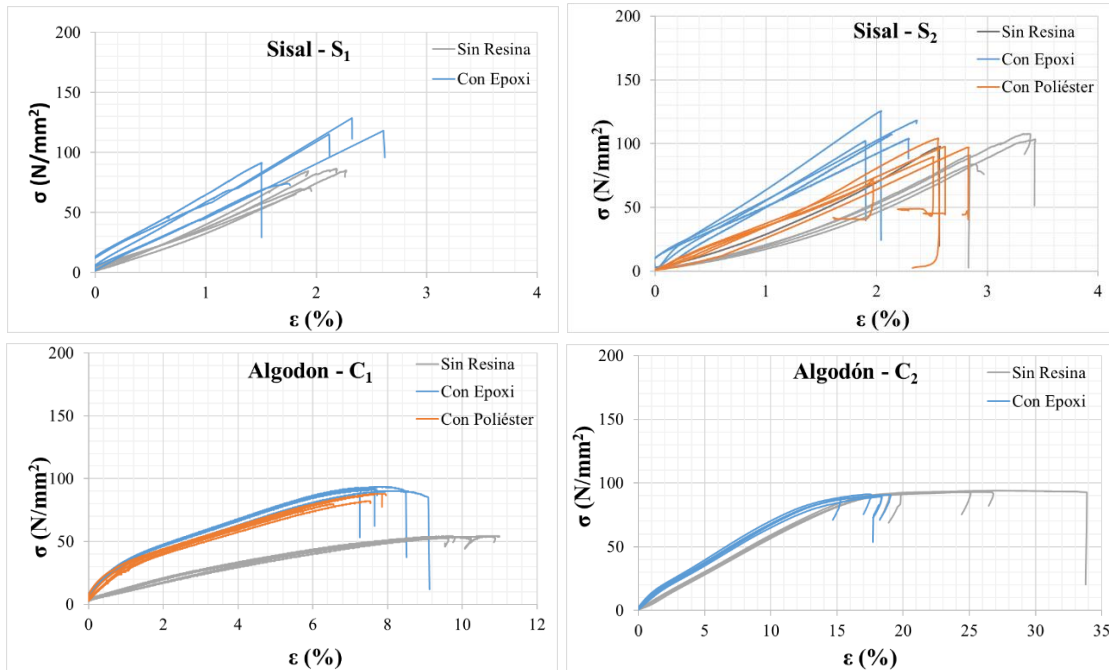


Figura 3.4. Diagrama de esfuerzo-deformación de hilos de fibras vegetales

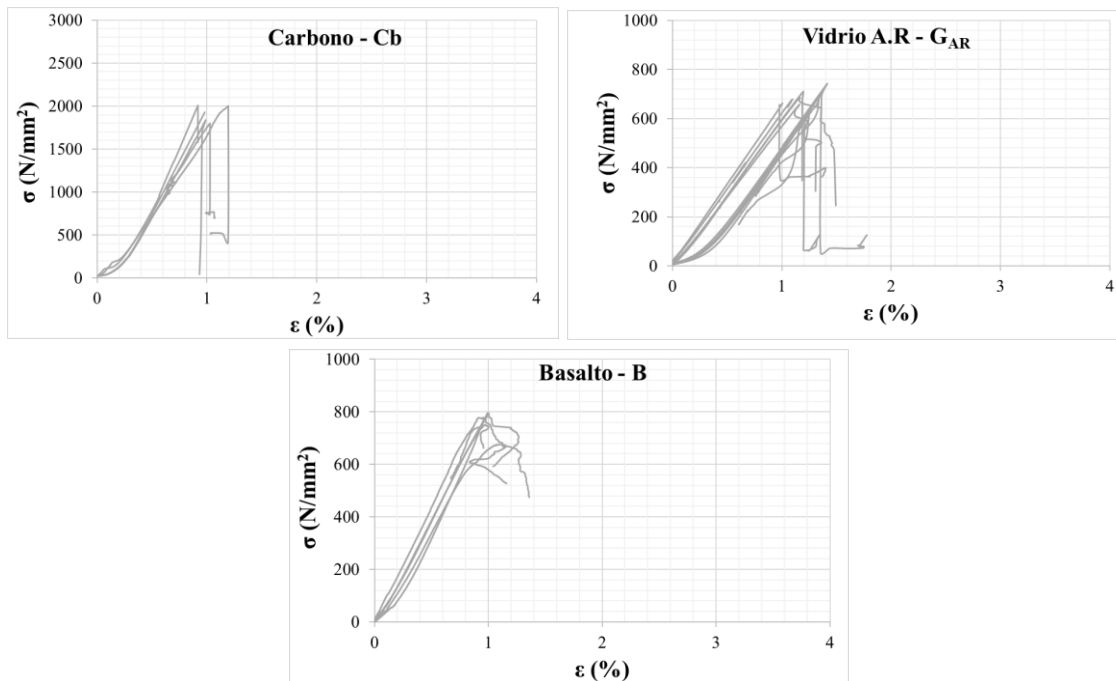


Figura 3.5. Diagrama de esfuerzo-deformación de hilos de fibras Sintéticas

3.6. Diseño y elaboración de las mallas

Se diseñaron mallas de fibra vegetal (ver Figura 3.6) usando como referencia la geometría de mallas comerciales utilizada en FRCM en otros estudios [56] y utilizando diferentes técnicas de tejido (Figura 3.7). Para alcanzar capacidades de carga comparables con las alcanzadas por las mallas comerciales de fibras sintéticas, se diseñaron mallas con mayor espesor (mayor volumen de fibras), manteniendo el suficiente espacio entre urdimbre y trama, para asegurar una interacción eficiente con la matriz.

Se utilizaron diferentes técnicas de tejido en la elaboración de la malla, para evaluar la influencia de estas técnicas en la interacción malla-mortero. Las técnicas de tejido utilizadas fueron: tejido de punto, tejido plano y tejido de cadena, y sin tejer.

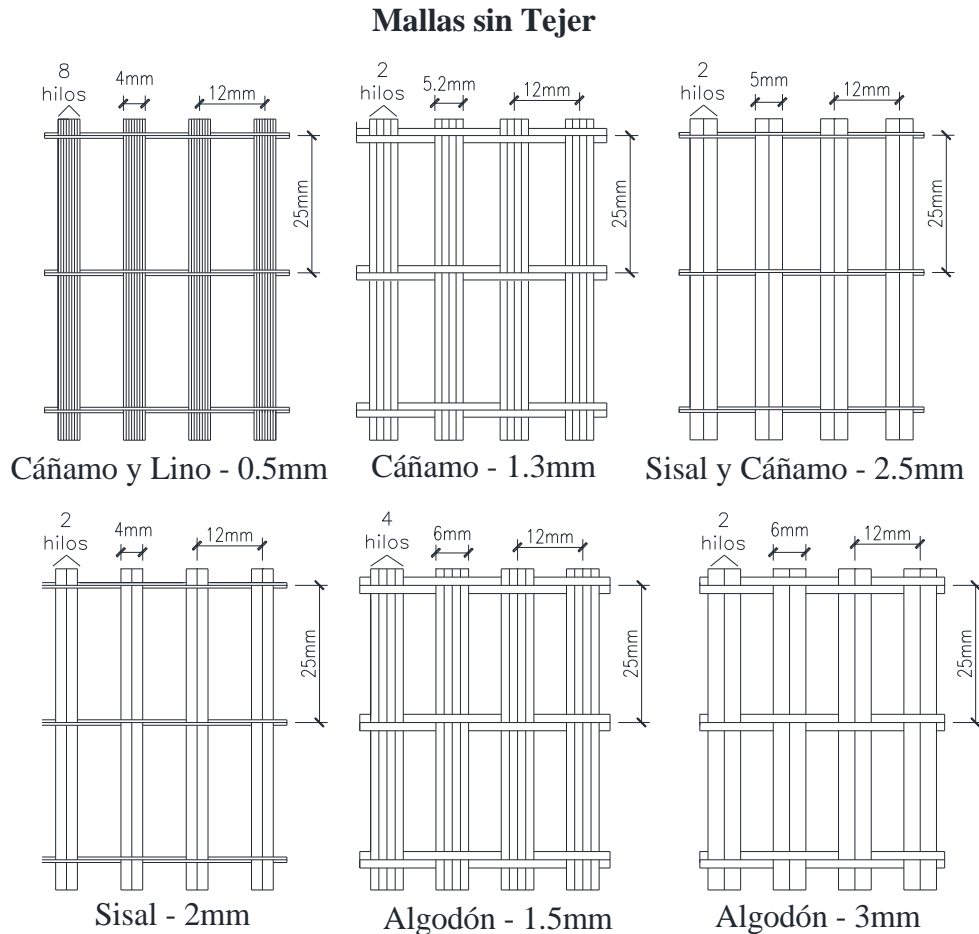


Figura 3.6. Diseño de mallas con mechones sin tejer

Mallas con Tejidos

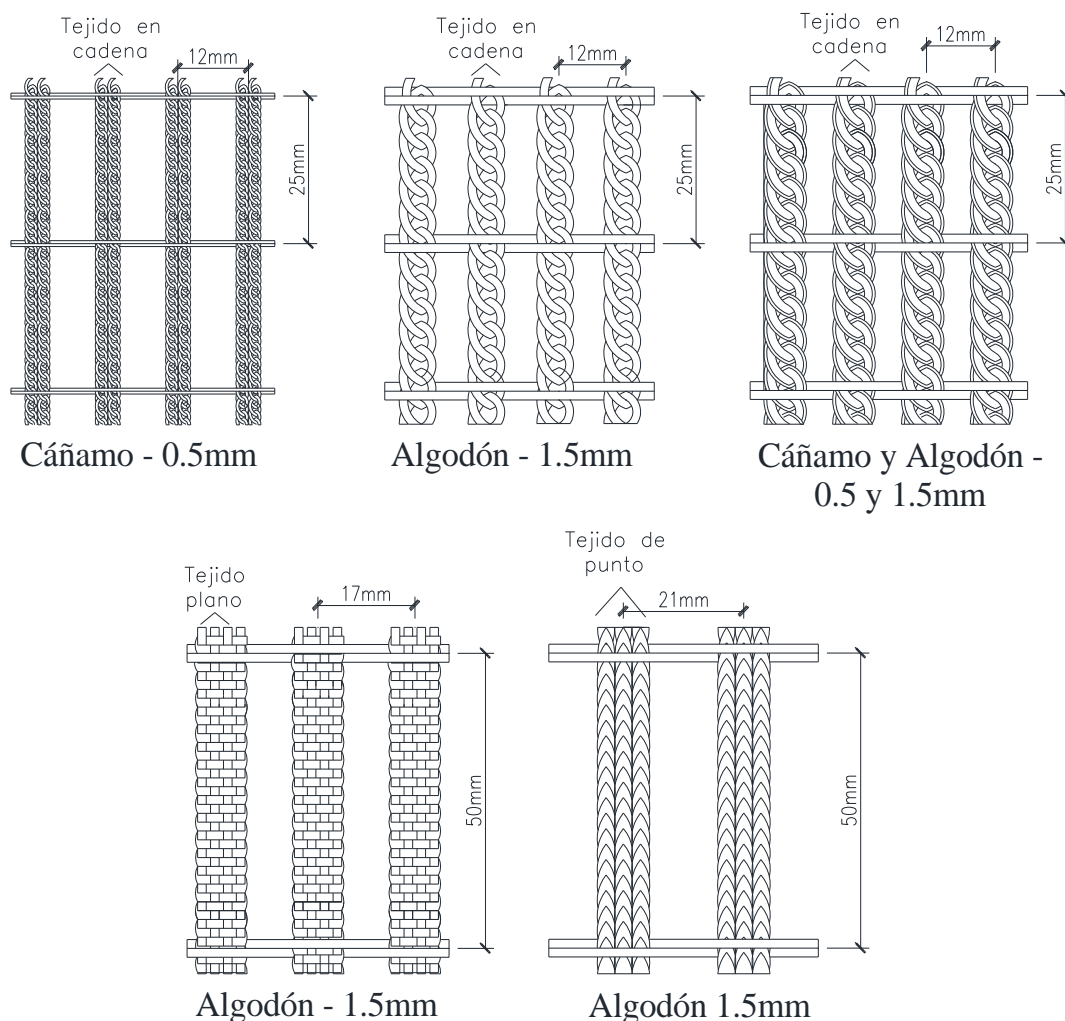


Figura 3.7. Diseño de mallas con mechones tejidos

Mallas con mechones sin tejer: Estas se elaboraron estirando los hilos en dirección de urdimbre de forma que los hilos quedarán paralelos entre sí, y formarán mechones de determinado ancho. En dirección de la trama se utilizó una aguja para poder entrelazar los mechones y darle la forma de mallas de refuerzo. Con esta forma de tejido se elaboraron 8 mallas revestidas con epoxi, 3 de cáñamo (0.5, 1.3 y 2.5 mm), 1 de lino (0.5 mm), 2 de sisal (2 y 2.5 mm), y 2 de algodón (1.5 y 3 mm). Además de estas se elaboraron 4 mallas revestidas con poliéster, 1 de cáñamo (0.5 mm), 1 de lino (0.5 mm), 1 de sisal (2.5 mm), 1 de algodón (1.5 mm).

Dado a los diferentes diámetros de hilos, el número de hilos utilizados en cada mechón fue diferente para cada tipo de malla, debido a que, si se usaba el mismo número de hilos en

todas las mallas, se aumentaría significativamente el volumen y la rigidez de algunas mallas. En las mallas de C  namo (2.5 mm), sisal (2 y 2.5 mm), la trama fue hecha con hilos de c  namo de 0.5 mm de espesor, y en el caso del algodón (3 mm) fue utilizado el hilo de algodón de 1.5 mm, para así reducir el espesor de la malla en el punto de cruce de la urdimbre con la trama.

Para la elaboración de las mallas con mechones tejidos solo fueron utilizados los hilos de c  namo de 0.5 mm de espesor y el de algodón de 1.5 mm, por las propiedades mecánicas presentados por estos hilos en el apartado 3.5, y por el aumento excesivo de espesor de la malla con hilos de mayor espesor.

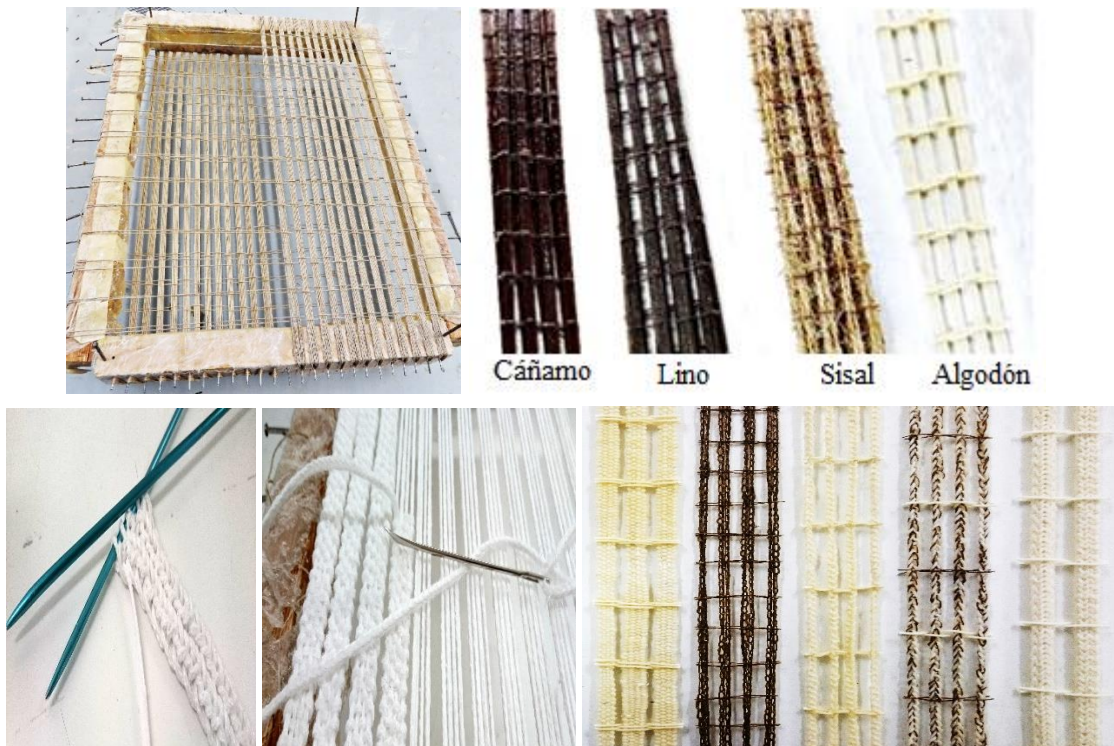


Figura 3.8. Elaboración de mallas de fibras vegetales

Mallas con tejidos de cadena: Esta es una técnica de tejido muy utilizado en joyería. Esta fue realizada con un gancho de tejer (ver Figura 3.8). Con esta técnica se elaboraron 3 mallas impregnadas con epoxi, 1 de algodón, 1 de c  namo y 1 mixta de algodón y c  namo.

Mallas con tejidos Planos: Esta consiste en un entrelazado perpendicular y paralelo de hilos (trama y urdimbre). En este la urdimbre y la trama están alineadas, por lo que forman un patrón simple entrecruzado. Esta técnica de tejido es uno de los más básico y utilizado en la producción de telas de moda y decoración.

Mallas con tejidos de punto: esta técnica de tejido crea múltiples vueltas de hilo, llamadas puntadas. Esta es una técnica común de tejido realizada con ganchos para tejer, donde se presentan múltiples puntadas activas en el gancho a la vez, y al final se obtienen varias filas consecutivas de entrelazado.

Las técnicas de punto y plana solo fueron aplicadas para el caso del algodón, debido la dificultad (espesor muy pequeño) para realizar estos tejidos a mano con el hilo de cáñamo de 0.5 mm.

Para diferenciar las diferentes mallas elaboradas y las comerciales utilizadas, se adoptó la nomenclatura presentada en la Tabla 3.5, esta nomenclatura fue adoptada considerando los nombres en ingles de las fibras, el espesor de los hilos, y la técnica de tejido.

Tabla 3.5 Nomenclatura de mallas

Nomenclatura	Fibra	Espesor de hilo (mm)	Técnica de tejido
H₁	Cáñamo	0.5	Sin tejer
H₁C		0.5	Cadena
H₂		1.3	Sin tejer
H₃		2.5	Sin tejer
H₁C₁C	Cáñamo y Algodón	0.5 y 1.5	Cadena
F	Lino	0.5	Sin tejer
S₁	Sisal	2	Sin tejer
S₂		2.5	Sin tejer
C₁	Algodón	1.5	Sin tejer
C₁C		1.5	Cadena
C₁P		1.5	Plano
C₁K		1.5	de Punto
C₂		3	Sin tejer
B	Basalto	0.159	Sin tejer
Cb	Carbono	0.094	Sin tejer
G	Vidrio álcali resistente	0.175	Sin tejer

Estas mallas fueron elaboradas en un molde rectangular de madera de 200 mm x 600 mm con clavos en los extremos. Estos fueron útiles para estirar y anclar los hilos, lo cual permitió elaborar las mallas. Una vez elaboradas las mallas fueron recubiertas con resina de manera manual con pincel, tomando como referencia el volumen de resina determinado en el apartado 3.3. Luego de un día de curado, las mallas se cortaron en especímenes de 40 × 390 mm.

3.6.1. Propiedades mecánicas de mechones

Con el objetivo de evaluar la influencia de las técnicas de tejidos en el comportamiento mecánicos de los hilos de cáñamo de 0.5 mm y algodón de 1.5 mm de espesor, y la diferencia entre las diferentes técnicas de tejidos, se tomaron muestras de mechones de las mallas con y sin (mechones tejidos) resina.

Los mechones tejidos con y sin resina con una longitud de 400 mm fueron pesados en una báscula de precisión, esto con el objetivo de determinar la cantidad de resina aplicada por cada mechón, su densidad lineal (peso de mechón/longitud), el peso de la malla y área de sección transversal (densidad lineal de mechón/densidad volumétrica del hilo). Estas propiedades se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Propiedades de mechones tejidos

Propiedades	HC	HCC	CC	CP	CK
Área mechón sin epoxi (mm ²)	1.51	4.89	6.20	20.72	25.41
Densidad lineal de mechones sin epoxi (g/m)	3.09	3.94	4.15	13.88	17.02
Densidad lineal de mechones con epoxi (g/m)	8.22	12.88	11.67	34.19	42.08
Epoxi/longitud de mechón (g/m)	5.13	8.94	7.52	20.31	25.06

Estos mechones fueron ensayados a tracción, con la misma configuración utilizada para los ensayos de los hilos a tracción (apartado 3.4). Los resultados de estos ensayos se muestran en la Tabla 3.7. En esta se muestran la resistencia a tracción ($\sigma_{m,u}$), el módulo de elasticidad (E_m) y la deformación pico ($\epsilon_{m,peak}$) obtenido de los ensayos de tracción. El área utilizada para calcular estas propiedades fue determinada a partir del producto del área del hilo por el número de hilo utilizado en el caso de los mechones sin tejer. Para el caso de los mechones tejidos fue utilizada en área presentada en la Tabla 3.6.

Los resultados mostrados en la Tabla 3.7 muestran como en el caso de los mechones sin tejer se alcanza un porcentaje de efectividad próximo al 100 % de la resistencia de los hilos revestidos con resina. Sin embargo, para el caso de los mechones tejidos, hay una pérdida significativa de las propiedades resistentes de los hilos. Esto debido a las disposiciones cruzadas en la que se encuentra los hilos en forma de tejidos. De los mechones tejidos, los tejidos en cadena son los que muestran mayor aprovechamiento de las propiedades resistentes de los hilos, seguido por los tejidos de puntos, y los tejidos planos, esto debido a la no influencia de los hilos de la trama en la resistencia a tracción de los mechones con tejidos planos.

En el caso de los mechones mixtos de cáñamo y algodón se puede ver una mezcla de las propiedades de ambos hilos, pues se alcanza una tensión mayor que en los mechones de algodón con tejido de cadena y una mayor elongación que los mechones de cáñamo con la misma técnica de tejido.

A pesar de las pérdidas de propiedades resistentes mostradas por los mechones tejidos, el principal objetivo de utilizar estos tipos de tejidos es mejorar la adherencia con la matriz a través de sus superficies irregulares, evitando de esta manera los fallos por deslizamientos que pudieran producirse en especímenes de FRCM.

Tabla 3.7 Resultados de ensayo a tracción de mechones

	No.	M	A_m (mm ²)	F_u (N)	$\sigma_{m,h}$ (MPa)	E_m (MPa)	$\epsilon_{m,pick}$ (%)	$\sigma_{m,u}/\sigma_{h,u}$ (%)	
Cáñamo	Sin Resina	3	H ₁ C	1.51	129.67	85.63 (17%)	1.58 (8%)	5.49 (12%)	28.97
		3	H ₁ CC	4.89	265.67	54.32 (3%)	0.26 (23%)	28.83 (15%)	-
	Epoxi	3	H ₁	1.57	916.33	583.65 (6%)	45.12 (9%)	1.24 (9%)	112.08
		3	H ₁ C	3.03	420.00	138.68 (4%)	10.80 (6%)	1.31 (3%)	26.63
		3	H ₁ CC	4.89	430.67	88.06 (5%)	4.19 (9%)	2.50 (7%)	-
	Poliéster	3	H ₁	1.57	733.00	466.88 (15%)	36.63 (9%)	1.22 (8%)	0.86
Algodón	Sin Resina	3	C ₁ C	6.20	251.67	40.61 (2%)	0.20 (5%)	25.20 (3%)	75.35
		3	C ₁ P	20.72	389.67	18.81 (1%)	0.14 (41%)	12.25 (0%)	34.89
		3	C ₁ K	25.41	781.33	30.75 (4%)	0.10 (5%)	51.73 (17%)	57.05
	Epoxi	3	C ₁	7.07	610.33	86.39 (18%)	1.36 (37%)	5.90 (8%)	93.95
		3	C ₁ C	6.20	374.67	60.46 (1%)	1.11 (11%)	6.11 (9%)	65.75
		3	C ₁ P	20.72	699.00	33.74 (6%)	1.00 (8%)	3.96 (5%)	36.69
		3	C ₁ K	25.41	1233.33	48.54 (3%)	0.56 (3%)	8.61 (6%)	52.79
	Poliéster	3	C ₁	7.07	588.00	83.23 (15%)	1.38 (18%)	5.58 (6%)	100.97

(%) = Coeficiente de Variación

3.6.2. Propiedades de las mallas

Como resultado de los ensayos de caracterización de los hilos y mechones, y los datos dados por el fabricante de las mallas comerciales de fibras sintéticas, en la Tabla 3.8 se muestran las propiedades mecánicas de las mallas elaboradas y utilizadas en este estudio.

Los valores presentados en la Tabla 3.8, muestran que a pesar de las bajas resistencia de las fibras vegetales es posible alcanzar la capacidad de carga de las mallas comerciales de fibras sintéticas, a través del aumento del volumen de fibras a utilizar.

Tabla 3.8 Propiedades mecánicas de las mallas

Fibras	Mallas	Espesor equivalente (mm)	Resistencia (KN/m)	Peso de malla (g/m ²)		Epoxi/Área de malla (g/m ²)	Poliéster/Área de malla (g/m ²)
				Con Epoxi	Con Poliéster		
Cáñamo	H ₁	0.131	68	600	796	337	526
	H ₁ C	0.126	35	692	-	205	-
	H ₁ C ₁ C	0.408	36	1085	-	757	-
	H ₂	0.377	56	753	-	525	-
	H ₃	0.818	115	1452	-	708	-
Lino	F	0.131	83	621	864	337	573
Sisal	S ₁	0.523	55	1070	-	672	-
	S ₂	0.818	91	1422	1635	788	1001
Algodón	C ₁	0.589	32	1410	1604	1000	1195
	C ₁ C	0.516	31	984	-	638	-
	C ₁ P	1.381	47	2019	-	1203	-
	C ₁ K	1.182	57	2011	-	1200	-
	C ₂	1.178	109	1572	-	978	-
Sintéticas	B	0.053	40		300	-	-
	Cb	0.047	90		168	-	-
	G	0.042	28		225	-	-

3.7. Conclusiones

Se llevaron a cabo ensayos a tracción de hilos y de fibras vegetales recubiertas y no recubiertas con resina, se elaboraron mechones con diferentes técnicas de tejidos, para finalizar con el diseño de mallas de fibras vegetales, destinadas al uso como refuerzo de materiales compuestos de matriz cementicia. A raíz de los resultados obtenidos se llegan a las siguientes conclusiones:

- De las fibras vegetales estudiadas la que presentó mayor resistencia a tracción fue la de lino, seguida por la de cáñamo, sisal y algodón.
- La influencia del revestimiento de resina sobre las propiedades mecánicas de los hilos fabricados con diferentes materiales dependió principalmente de la capacidad de la resina para penetrar en su estructura interna. Esto se puede apreciar en el caso de los hilos recubiertos con poliéster, ya que esta resina tenía una fluidez menor que la resina epoxi.
- El revestimiento de resina aumenta la resistencia a la tracción y la rigidez en casi todos los hilos de fibras vegetales ensayados, sobre todo, en el caso del hilo de cáñamo cuya resistencia a la tracción y módulo de elasticidad aumentaron en un 84%

y un 92%, respectivamente. Por lo tanto, es necesario aplicar un control preciso sobre el procedimiento de recubrimiento para evitar alterar el comportamiento mecánico deseado.

- El comportamiento mecánico de los mechones de las mallas se ve comprometido por la técnica de tejido a utilizar. Pues para el caso de los mechones tejidos, hay una pérdida significativa de las propiedades resistentes de los hilos, debido a las disposiciones cruzadas en la que se encuentra los hilos en forma de tejidos.
- Las malla diseñadas y elaboradas presentan la posibilidad de alcanzar la capacidad de carga de las mallas comerciales de fibras sintéticas, a través del aumento del volumen de fibras.

Capítulo IV. Caracterización de FRCM de fibras vegetales

4.1. Introducción

La interacción malla-matriz y FRMC-sustratos son los principales factores que intervienen en la efectividad del FRCM como técnica de refuerzo, pues si el sustrato a reforzar no es capaz de transmitir las tensiones a la matriz, está a la vez no es capaz de transmitir estas tensiones a los tejidos, y la utilidad de la de técnica se ve limitada.

Por lo que es necesario antes de aplicar el FRCM como técnica de refuerzo conocer el comportamiento de la interface malla-matriz y FRCM-sustrato, identificar los tipos de fallos que se pueden presentar, y que propiedades mecánicas es capaz de alcanzar el compuesto, confirmando así la real efectividad de la matriz y la malla que componen el FRCM.

Una vez diseñadas y elaboradas las mallas de fibras vegetales impregnadas con resina, estas mallas fueron utilizadas para fabricar especímenes de FRCM. Esto con el objetivo de analizar el comportamiento de las diferentes mallas dentro de la matriz cementicia de mortero. Para ello se diseñaron sistemas de ensayo específicos (ensayos de tracción de FRCM y de adherencia FRCM-ladrillo) que permitan la caracterización experimental del proceso de deslizamiento de la malla en el interior de la matriz, que debería resultar fundamental para entender los procesos de multifisuración y disipación de energía de rotura frente a acciones sísmicas.

Este capítulo se centrará en describir los procedimientos utilizados para la fabricación y ensayo de los especímenes de FRCM, y así analizar los resultados obtenidos de estos ensayos.

4.2. Materiales

4.2.1. Mallas

Las mallas utilizadas como refuerzo en los especímenes de FRCM fueron las mallas descritas en el apartado 3.6.

4.2.2. Matriz

Para preparar especímenes de FRCM, se utilizaron dos tipos de mortero, el mortero Sika MonoTop 618, un mortero tixotrópico a base de cemento y resinas sintéticas, con humo de sílice y reforzado con fibras de poliamida, el cual cumple con los requisitos del tipo R3 definido en UNE-EN 1504-3 [57]. Y el mortero Nivoplan, un polvo blanco, compuesto de cemento, áridos seleccionados y resinas sintéticas especiales, útil para nivelación de paredes, reparación de viejos revocos deteriorados, regularización de superficies de mortero y de hormigón armado, nivelación de paredes de hormigón celular y ladrillo.



Figura 4.1. Ensayo a flexión y compresión de controles de mortero

Tabla 4. 1 Propiedades de morteros

Mortero:	Sika	Nivoplan
Densidad del mortero fresco⁽¹⁾:	2.1 kg/l	1.83 kg/l
Relación agua/mortero⁽¹⁾:	16.6%	25%
Granulometría⁽¹⁾:	0-2 mm.	polvo
Resistencia a Compresión⁽²⁾:	37.41 MPa	8.56 MPa
Resistencia a Flexión⁽²⁾:	5.83 MPa	4.79 MPa
Resistencia a Tracción⁽²⁾:	2.57 MPa	2.12 MPa

(1) Datos de fabricante, (2) Resultados de ensayos EN 1015-11: 2000

Para conocer las propiedades mecánicas de estas dos matrices se tomaron probetas control de mortero de 4×4×16 cm, para luego ensayarlas a los 28 días a flexión en una prensa electromecánica de 50 KN y luego ensayar las mitades resultantes a compresión con un

actuador hidráulico MTS de 100 KN de capacidad (en el Anexo A se presenta una mayor descripción del procedimiento de ensayo). Estos ensayos se realizaron de acuerdo con EN 1015-11: 2000 [58]. Los resultados promedio de los ensayos, y otras propiedades mecánicas (suministradas por el fabricante) se resumen en la Tabla 4. 1.

4.3. Comportamiento del FRCCM a tracción

4.3.1. Fabricación de especímenes

90 especímenes de FRCCM se fabricaron con las mallas y morteros mencionadas anteriormente, y 6 sin malla (3 repeticiones por cada espécimen). En el caso de la matriz Sika se utilizaron malla con epoxi y mallas con poliéster, y en el caso de Nivoplan solo se utilizó mallas impregnadas con poliéster. Se prepararon moldes de madera para fabricar muestras de $10 \times 50 \times 400$ mm. El procedimiento de fabricación consistió en:

- Colocar una fina capa de desmoldante en los moldes
- Colocar una primera capa de mortero en el molde de aproximadamente 5 mm de espesor.
- Colocar la malla de forma que penetre ligeramente en esta primera capa de mortero.
- Colocar la segunda capa de mortero, alcanzando el espesor total de 10 mm (Figura 4).
- Después de 7 días de curado, desmoldar las muestras y luego dejar curando en ambiente de laboratorio durante 28 días.
- Durante el proceso de curado, adherirles 4 placas de metal a cada espécimen de FRCCM en sus extremos (una en cada lado), por medio de un adhesivo bicomponente epoxi. Esto para facilitar la conexión con el sistema de ensayo. La longitud del espécimen adherida a esta placa fue de 100 mm (utilizada por otros estudios [59][60]).



Figura 4.2. Fabricación de especímenes de FRCCM

4.3.2. Configuración de ensayo a tracción de FRCM

En el caso muestra de FRCM sometida a tracción, ya hay muchos estudios [35][61][62][63] que han analizado su comportamiento. Dos de las configuraciones de ensayo más utilizadas ha sido el "sistema de mordaza", que utiliza la fricción para la aplicación de carga mediante la aplicación de una fuerza de compresión normal al plano de la muestra en sus extremos, y el "sistema de horquilla", en el que el mecanismo de transferencia entre el espécimen y el agarre se realiza mediante tensión adhesiva y tangenciales mediante placas metálicas pegadas a los extremos del espécimen.

El sistema de horquilla fue la elección para este estudio porque reproduce el comportamiento que los materiales de FRCM presentan en el campo, pues permite el deslizamiento de la malla, al contrario de un sistema mordaza, donde el deslizamiento de la malla está limitado por la compresión de las pinzas mecánicas.

Los especímenes de FRCM fueron ensayadas tomando como referencia el procedimiento descrito por AC434-0213-R1 [64]. Estos fueron ensayados a los 28 días de curado en la prensa electromecánica MTS Insight mencionada anteriormente, a una velocidad de 5 mm/min, capturando las deformaciones con el extensómetro de 25 mm de alcance, colocado en un sistema desplazable unido a las placas de apoyo a través de dos imanes, que permitió medir las deformaciones en la zona ubicada entre los bordes de la placa de poyo de los especímenes.



Figura 4.3. Ensayo a tracción de FRCM

4.3.3. Resultados y discusiones

4.3.3.1 Modos de Fallos

Se observaron tres modos de falla: rotura de la malla, desprendimiento del mortero y deslizamiento de la malla (ver Figura 4.4).

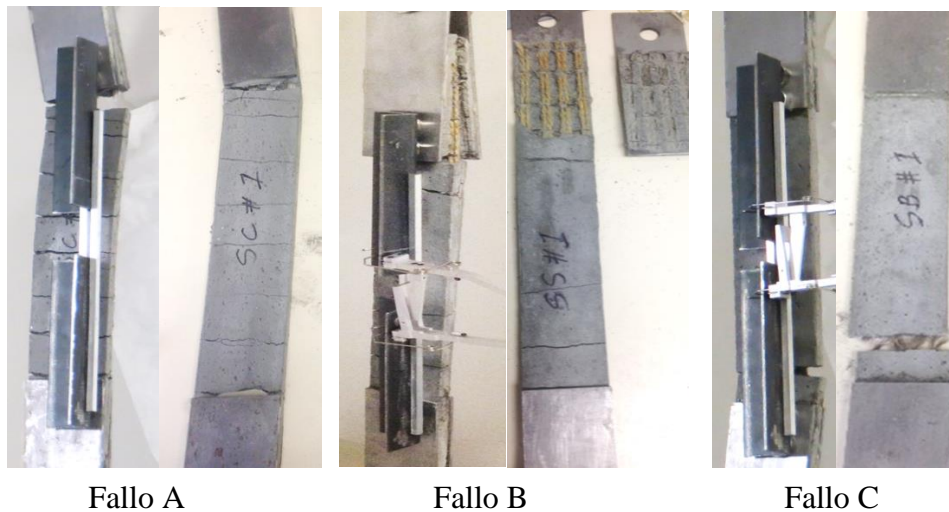
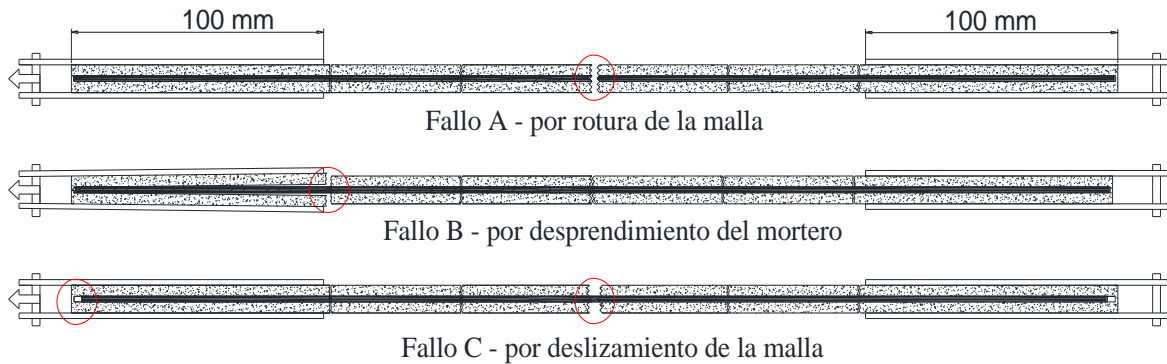


Figura 4.4. Modos de fallo de FRCM

Fallo A - por rotura de malla: Este ocurrió en algunos especímenes de mortero Sika con hilos de cáñamo de 0.5 y 1.3 mm de espesor, lino de 0.5 mm, sisal de 2 mm y algodón de 1.5 mm. Este modo de fallo no es común en las muestras con mallas sintéticas ensayadas con el sistema de horquilla en otros estudios [60][59] (donde es común el fallo por deslizamiento de la malla). Esto tal vez se debe al hecho de que el revestimiento mejoró la adherencia de la malla dentro de la matriz [34] [48], evitando así el fallo por deslizamiento. Este modo de fallo indica un mayor uso de la capacidad a tracción de los hilos de fibras vegetales.

Fallo B - por desprendimiento del mortero: Este se presentó en todos los especímenes de FRCM fabricado con el mortero Nivoplan y en los de Sika con malla de sisal y cáñamo con hilos de 2.5 mm de espesor, y en algunos especímenes de cáñamo, lino y algodón. Se cree que este modo de fallo (que no se ve comúnmente en otros estudios que utilizaron el sistema de horquilla) está asociado con el intento de deslizamiento de la malla y el mayor espesor de malla en algunos casos (SH3 y SS2), debido a que la sección de mortero no es capaz de permitir el deslizamiento de la malla con grandes espesores (2.5 mm).

En caso de los FRCM con Nivoplan este fallo se debe a la incapacidad de la matriz de absorber las tensiones tangenciales transmitida por las mallas, una vez fisurado el mortero.

Este modo de fallo también puede estar influenciado por la longitud adherida a la placa (100 mm) porque algunos estudios [63][34] han demostrado que esto afecta el comportamiento a tensión de los compuestos de FRCM, dichos estudios sugirieron una longitud adherencia de 150 mm para un espécimen con dimensiones similares a las utilizadas en este estudio.

En el caso de FRCM con malla recubierta con poliéster, el fallo por desprendimiento del mortero estuvo más presente. Esto puede deberse a que la adherencia con la matriz proporcionado por el poliéster era más débil que el de la malla revestida con epoxi.

Fallo C - por deslizamiento de la malla: Este solo se produjo en las muestras de FRCM con mortero Sika y fibras sintéticas (basalto y carbono). En el caso del FRCM de basalto una vez alcanzo la tensión de fisuración del mortero, la malla no fue capaz de alcanzar una tensión mayor, sin embargo, las de carbono una vez alcanzada la tensión de fisuración fue capaz de seguir soportando carga hasta alcanzar una tensión más alta que la del mortero, pero al final el fallo también se produjo por deslizamiento. Esto indica una falta de adhesión entre la malla y el mortero.

El número de fisuras desarrolladas en los FRCM de fibra vegetales dependió de las propiedades mecánicas de las mallas recubiertas con resina y del espesor de estas mallas. Los FRCM de cáñamo, lino y sisal mostraron una respuesta más rígida que los del algodón. Esto es consistente con el comportamiento más rígido de los hilos revestidos presentados en el capítulo 3. En los casos de FRCM de cáñamo, lino y sisal se desarrollaron entre tres y seis fisuras. Sin embargo, los FRCM de algodón desarrollaron entre 7 y 18 fisuras (se observaron más fisuras en los casos con malla de algodón recubierta de epoxi y mallas con tejidos de punto y cadena). Esto indica una interacción malla-matriz adecuada, pues permitió el uso de la alta capacidad de elongación de los hilos de algodón.

En el caso específico de los especímenes de FRCM con la malla de algodón con hilos de 3 mm de espesor (SC2), el fallo se produjo por el despegue de las placas de apoyo. Para este caso, a diferencia del caso anterior (fallo B), solo se produjo el desprendimiento de la placa (sin haber desprendimiento del mortero), por lo que se asume, que este fallo se produjo debido a las múltiples fisuras originadas en el mortero, en especial las situadas debajo de la placa de apoyo, que a su vez fueron causadas por la gran capacidad de alargamiento del algodón trenzado.

4.3.3.2. Propiedades mecánicas del FRCM

Los resultados obtenidos de los ensayos de tracción de los especímenes de FRCM se muestran en la Tabla 4.2. Esta muestra la tensión máxima ($\sigma_{c,u}$) calculada utilizando el área de la sección transversal de la malla, debido a que es la que absorbe la carga cuando el mortero se fisura, la tensión al momento de producirse la primera fisura (σ_{mc}), calculada considerando el área bruta de los especímenes de FRCM, la deformación pico ($\varepsilon_{c,peak}$) calculada partir de una longitud inicial de 200 mm, y los módulos de elasticidad (E_I, E_{II}, E_{III}) calculados a partir de las zonas lineales del grafico esfuerzo deformación mostrado en la Figura 4.7 y 4.8.

En la Tabla 4.2, se puede observar que las muestras de mortero no reforzado con mortero Sika presentaron una resistencia a la tracción promedio de 4.61 MPa, que es mayor que la resistencia a la tracción calculada indirectamente a partir de los resultados de los ensayos de flexión en el mortero de control ($40 \times 40 \times 160$ mm) especímenes (2.9 MPa). Sin embargo, en el caso de los especímenes no reforzados con mortero Nivoplan alcanzaron una resistencia a tracción menor (1.19 MPa) que la resistencia a tracción en los especímenes de control ensayados a flexión de Nivoplan (2.12 MPa).

Para el caso de los FRCM con mortero Nivoplan la mayoría de las muestras se fisuraron durante la colocación de las muestras a ensayar, por lo que no se pudo determinar la tensión de inicio de fisuración, ni el módulo de elasticidad antes de la fisuración del mortero. Tampoco se pudo determinar el módulo de elasticidad en las demás etapas, debido al fallo prematuro del espécimen por desprendimiento del mortero.

El compuesto de FRCM con mortero Sika que mostró la carga ultima más alta fue el FRCM de cáñamo de 2.5 mm, seguido por el de sisal de 2.5 mm, el cáñamo de 1.3 mm, el cáñamo de 0.5 mm revestido con epoxi, el cáñamo de 0.5 mm recubierto con poliéster, el algodón de 3 mm, el lino de 0.5 mm recubierto con poliéster, y el algodón de 0.5 mm recubierto con epoxi.

Tabla 4.2 Resultados de ensayo a tracción de FRCM

	Ensayos	M	A _t	σ _{mc} (MPa)	F _u (N)	σ _{c,u} (Mpa)		σ _{c,u} /σ _{h,u} (%)	E _I		E _{II}		E _{III}		ΔE/E _h (%)	ε _{c,pick} (%)	Fallo					
							(%)			(%)		(%)		(%)			A	B	C			
Mortero	3	S	-	-	2303	4.61	(11%)	-	8.92	(40%)	-	-	-	-	0.06	(35%)	-	-	-			
	3	N	-	-	597	1.19	(5%)	-	4.59	(52%)	-	-	-	-	0.04	(59%)	-	-	-			
Cáñamo	3	SH1	6.28	5.50	(1%)	3481	554.25	(14%)	106.30	21.5	(20%)	99.52	(12%)	46.18	(22%)	-19.20	1.40	(14%)	1	2	-	
	3	SH2	21.23	4.46	(5%)	3505	165.12	(3%)	110.58	22.40	(46%)	29.98	(3%)	9.65	(9%)	-12.07	1.66	(8%)	3	-	-	
	E	3	SH3	76.93	3.77	(11%)	4022	52.29	(6%)	37.05	14.13	(29%)	5.70	(32%)	2.62	(12%)	69.47	1.69	(23%)	-	3	-
	3	SH1C	6.06	1.48	(32%)	1899	313.51	(4%)	112.72	2.93	(46%)	67.50	(19%)	9.92	(8%)	8.13	1.90	(18%)	3	-	-	
	3	SH1CC	19.56	1.35	(5%)	2007	102.61	(3%)	116.52	4.54	(31%)	31.95	(22%)	1.36	(21%)	67.51	3.19	(15%)	3	-	-	
	P	3	SH1	6.28	3.70	(6%)	2985	475.30	(11%)	87.34	13.03	(38%)	42.20	(16%)	32.64	(12%)	35.47	2.20	(20%)	1	2	-
	3	NH1	6.28	-	-	596	94.91	(8%)	17.44	-	-	-	-	-	-	0.54	(72%)	-	3	-		
	E	3	SF	6.28	4.38	(24%)	2615	416.35	(11%)	66.00	13.73	(20%)	58.92	(38%)	35.83	(32%)	0.50	1.79	(22%)	1	2	-
Lino	P	3	SF	6.28	4.01	(20%)	2756	438.93	(11%)	84.95	9.78	(37%)	51.75	(18%)	19.90	(23%)	47.56	2.33	(24%)	1	2	-
	3	NF	6.28	-	-	713	113.57	(8%)	21.98	-	-	-	-	-	-	0.56	(38%)	-	3	-		
Sisal	E	3	SS1	25.12	2.76	(6%)	2872	114.34	(9%)	108.34	5.28	(8%)	13.77	(22%)	5.17	(23%)	-10.07	2.22	(20%)	3	-	-
	3	SS2	39.25	3.88	(10%)	3697	94.18	(8%)	84.51	16.74	(60%)	18.34	(19%)	2.04	(31%)	58.11	2.95	(12%)	-	3	-	
	P	3	SS2	39.25	2.17	(5%)	1684	42.90	(36%)	46.46	8.70	-	2.29	(33%)	1.66	(33%)	56.08	3.26	(23%)	-	3	-
	3	NS2	39.25	-	-	304	7.74	(26%)	8.38	-	-	-	-	-	-	0.94	(57%)	-	3	-		
Algodón	3	SC1	28.26	2.80	(18%)	2711	95.94	(5%)	104.34	6.22	(27%)	6.02	(47%)	0.53	(5%)	43.01	8.04	(12%)	3	-	-	
	3	SC2	56.52	3.66	(5%)	3276	57.96	(4%)	64.55	7.58	-	3.95	(43%)	0.295	(22%)	50.78	12.21	(13%)		*		
	E	3	SC1C	24.79	2.21	(51%)	1619	65.33	(3%)	108.05	8.02	(4%)	16.32	(37%)	0.22	(20%)	79.81	8.21	(12%)	3	-	-
	3	SC1P	62.15	1.89	-	2220	35.71	(2%)	105.85	9.87	-	5.73	(19%)	0.252	(27%)	74.94	4.82	(18%)	3	-	-	
	3	SC1K	50.81	1.67	(8%)	2574	50.66	(2%)	104.36	1.87	(39%)	5.33	(46%)	0.23	(3%)	58.80	9.00	(8%)	3	-	-	
	P	3	SC1	28.26	2.39	(18%)	2172	76.86	(2%)	93.23	6.55	(40%)	9.38	(69%)	0.71	(22%)	19.32	6.51	(12%)	1	2	-
	3	NC1	28.26	-	-	937	33.14	(15%)	40.20	-	-	-	-	-	-	2.53	(19%)	-	3	-		
Sintética	3	SB	2.40	3.56	(17%)	1782	742.52	(17%)	97.23	6.63	(21%)	304.14	0.17	-	-	-	0.24	(21%)	-	-	3	
	3	NB	2.40	-	-	523	217.72	(24%)	28.51	-	-	-	-	-	-	0.64	(77%)	-	-	3		
	3	SCb	2.35	4.42	(3%)	2429	1034	(6%)	53.95	6.46	(2%)	227.27	(21%)	118.45	(28%)	49.74	1.23	(3%)	-	-	3	

N: Nivoplan, S: Sika, E: Epoxi, P: Poliéster, * Fallo por desprendimiento de la paca de apoyo

Sin embargo, la tensión más alta en la malla se observó en el FRCM de cáñamo de 0.5 mm revestido con epoxi, seguido por el cáñamo de 0.5 mm recubierto con poliéster y el lino de 0.5 mm recubierto con poliéster. Las diferencias entre el orden de la carga final y el orden de las tensiones sobre la malla están relacionadas con los diferentes volúmenes de fibras utilizadas.

En Figura 4.5 se muestran las tensiones de fisuración de los compuestos de FRCM, en esta se puede apreciar como en los compuestos de cáñamo la tensión de fisuración disminuye a medida que aumenta el espesor de la malla. Sin embargo, esto no ocurre en el caso de los FRCM de sisal y algodón, donde se presentaron mayores tensiones de fisuración en los casos de hilos de mayor espesor.

También en el caso de los FRCM con mallas recubiertas con poliéster se observó una reducción de la tensión de fisuración en todos los casos, esto puede deberse a una menor compatibilidad de este tipo de recubrimiento con la matriz en comparación con el recubrimiento con epoxi.

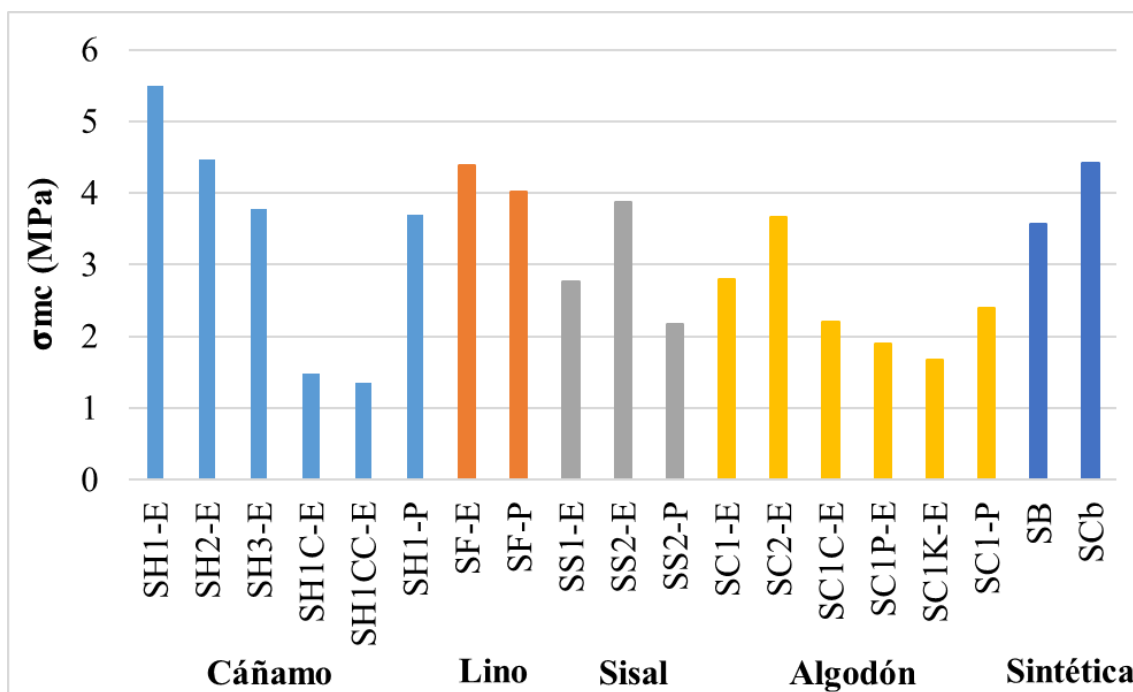


Figura 4.5. Tensiones de fisuración

Otro caso en el que la tensión de fisuración resultó menor fue en el caso de los FRCM con mallas de mechones tejidos. Esto puede deberse al hecho de que en los mechones tejidos los

hilos no están orientados en la misma dirección, lo cual provoca que al estirar los mechones tengan una mayor deformación inicial, y tiendan a provocar una fisuración prematura.

En la Tabla 4.2, se incluye el porcentaje de utilización de la resistencia a tracción de los hilos. Esto se calculó como la relación entre la tensión última alcanzada por la malla en el FRCM, y la resistencia a tracción de los hilos ($\sigma_{c,u}/\sigma_{h,u}$) determinada en el capítulo 3. Debe destacarse que todas las mallas de fibras vegetales estaban recubiertas por resina y, por lo tanto, la resistencia a tracción final de los hilos o mechones (en caso de los mechones tejidos) usada para calcular esta relación, correspondía también a los hilos o mechones recubiertos. Esta relación se aprecia mejor en la Figura 4.6.

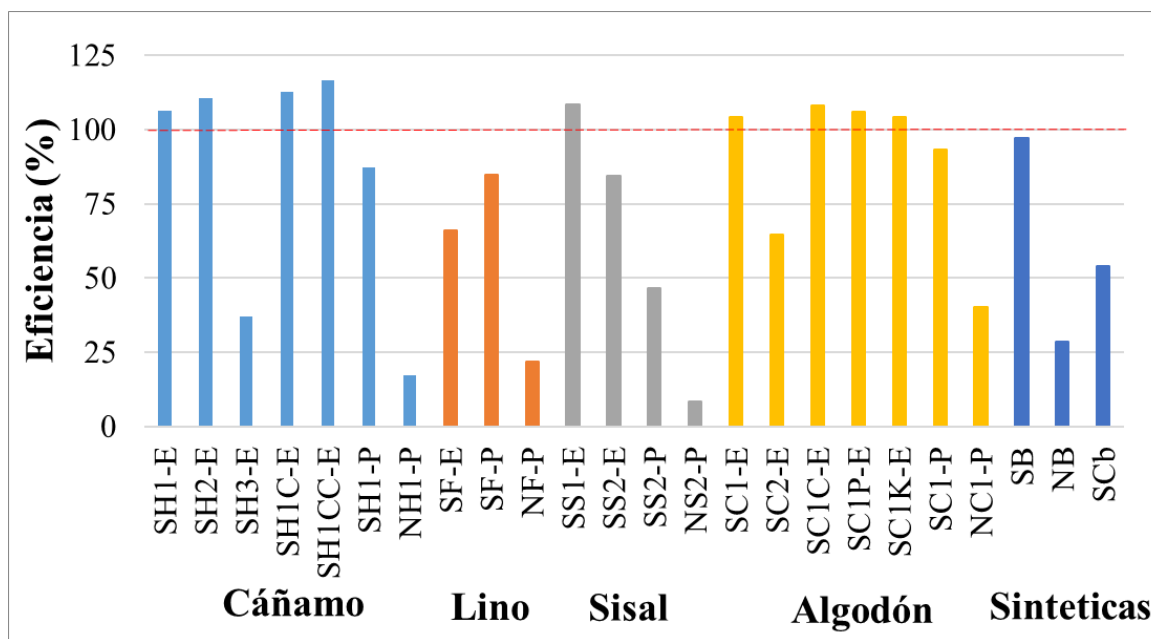


Figura 4.6. Rendimiento de mallas en el FRCM

Los resultados mostraron que de los FRCM con mortero Sika y mallas con mechones sin tejer, el de cáñamo de 1.3 mm (SH2-E) fue el que presentó mayor porcentaje de utilización de la resistencia mecánica de las fibras (110 %, posiblemente debido a la variabilidad de los resultados experimentales de los hilos), seguido por la de cáñamo de 0.5 mm, el de algodón de 1.5 mm, sisal de 2 y 2.5 mm y lino de 0.5 mm, en el caso de mallas revestidas con epoxi. Sin embargo, de las mallas revestidas con poliéster, la que mostró el mayor porcentaje de utilización dentro del FRCM fue la de algodón (SC1-P), seguido por la de cáñamo, lino y sisal.

En la Tabla 4.2 también se muestra el número de muestras que fallaron según la nomenclatura de fallo establecida en la Figura 4.4, lo que permite distinguir la influencia del

tipo de fallo en los porcentajes de rendimiento de las fibras vegetales dentro de los compuestos.

En el caso de los FRCM con cáñamo de 2.5mm, sisal de 2.5mm, algodón de 1.5mm, el porcentaje de aprovechamiento de la resistencia mecánica de las fibras a tracción se vio afectado por el tipo de fallo (fallo B), pues como se indica en la tabla todos estos especímenes fallaron por desprendimiento del mortero, evitando que las mallas alcanzaran su carga última de rotura.

Comparando los FRCM con mallas revestidas con epoxi con los FRCM con mallas revestidas con poliéster, se observa que los FRCM con mallas revestidas con epoxi exhibieron un mejor rendimiento que los FRCM con mallas revestidas con poliéster (con excepción de las mallas de lino). Esto indica que el recubrimiento con epoxi asegura una mejor adhesión con una matriz de mortero, que con un recubrimiento con poliéster.

Por otro lado, analizando los rendimientos alcanzados por las mallas con mechones tejidos, se observa rendimientos sobre el 100% (ver Figura 4.6), y alcanzaron la rotura en todos los casos, esto indica una buena adherencia con la matriz, sin embargo, la adherencia también fue buena en los casos de los mechones sin tejer revestidos con epoxi (en los casos de FRCM de cáñamo y algodón).

Un dato a destacar, es que a pesar de los elevados espesores de las mallas de algodón C₂, C_{1P} y C_{1K}, en ningún caso se presentó fallo por desprendimiento del mortero. Esto se puede deber a la flexibilidad mostrada por las mallas de algodón, lo cual le permite adaptarse mejor que otras mallas dentro de la matriz, una buena adherencia con esta, y una mayor capacidad de disipar energía.

Con respecto a los FRCM de fibras sintéticas, se observa que a pesar de que la malla de basalto alcanzó un porcentaje de rendimiento de la malla (97%) mayor que algunas mallas de fibras vegetales, el fallo final fue por deslizamiento, y además no excedió la resistencia a la tracción de las muestras de mortero Sika sin reforzar. Una posible explicación para esta respuesta sería que la carga fue soportada solo por el mortero hasta la tensión de fisuración.

En el caso de los FRCM de carbono, este sí fue capaz de alcanzar mayores tensiones que la tensión de fisuración del mortero, sin embargo, el fallo final fue por deslizamiento de la malla, y el porcentaje de rendimiento de la malla (54%) fue muy bajo en comparación con la mayoría de las mallas de fibras vegetales.

Los resultados mostrados en los FRCM reforzados con mallas comerciales de fibras sintéticas muestran la necesidad de recurrir al recubrimiento de estas mallas con resina, para mejorar el rendimiento de dichas mallas dentro de la matriz.

El módulo de elasticidad presentado en la Tabla 4.2 se determinó considerando el modelo trilineal presentado por Aveston-Cooper-Kelly (ACK) [65][66]. El módulo de elasticidad se calculó para cada estado. Esto se calculó a partir del diagrama esfuerzo-deformación de FRCM que se muestra en las Figura 4.7 y 4.8. E_I se calculó en la primera pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación (donde no hay fisuras) considerando la tensión en la sección bruta de las muestras. E_{II} se calculó en la primera pendiente después de la primera fisura del mortero teniendo en cuenta la resistencia a la tracción de la sección de malla. E_{III} se calculó en la última pendiente también considerando la resistencia a la tracción de la sección de malla.

E_{II} y E_{III} muestran una fuerte degradación de la rigidez en los compuestos de FRCM debido a la interacción malla-matriz en el segundo estado del modelo trilineal.

El índice de daño ($\Delta E/E_h$) en el módulo de elasticidad en la zona III presentado en Tabla 4.2 se calculó a partir de la variación entre el módulo de elasticidad en la etapa III y el módulo de elasticidad de los hilos o mechones revestidos con resina. Esto muestra el daño acumulado en el módulo de elasticidad de los hilos después de la interacción malla-matriz en la etapa II. En el caso de FRCM de cáñamo de 0.5 y 1.3 mm, el sisal de 2 mm, y el lino de 0.5 mm con epoxi, el módulo elasticidad parece no haber sido afectado.

Los diagramas de esfuerzo-deformación de los especímenes de FRCM se presentan en las Figura 4.7 y 4.8. Para graficar estos datos, las áreas seccionales de las mallas fueron consideradas para calcular las tensiones. Los resultados muestran el comportamiento de multifisura de los compuestos de FRCM asociados a la interacción malla-mortero a partir de la primera fisura del mortero. Este comportamiento de multifisura es similar al obtenido por otros estudios [34], aunque en este estudio la interacción malla-mortero es más notable.

Comparando los compuestos de FRCM con mallas recubiertas de epoxi con FRCM con mallas recubierta de poliéster, se observa que los FRCM con mallas con epoxi alcanzaron un mejor rendimiento que los FRCM con mallas con poliéster. Esto indica que el recubrimiento con epoxi asegura una mejor adhesión con la matriz que el recubrimiento con poliéster.

Los FRCM de fibras vegetales, presentaron un patrón de multifisura (ver Figura 4.7 y 4.8) antes del fallo total, mostrando una mejor compatibilidad entre la matriz y mallas de fibras vegetales recubiertas con resina, en comparación con los FRCM de basalto y carbono.

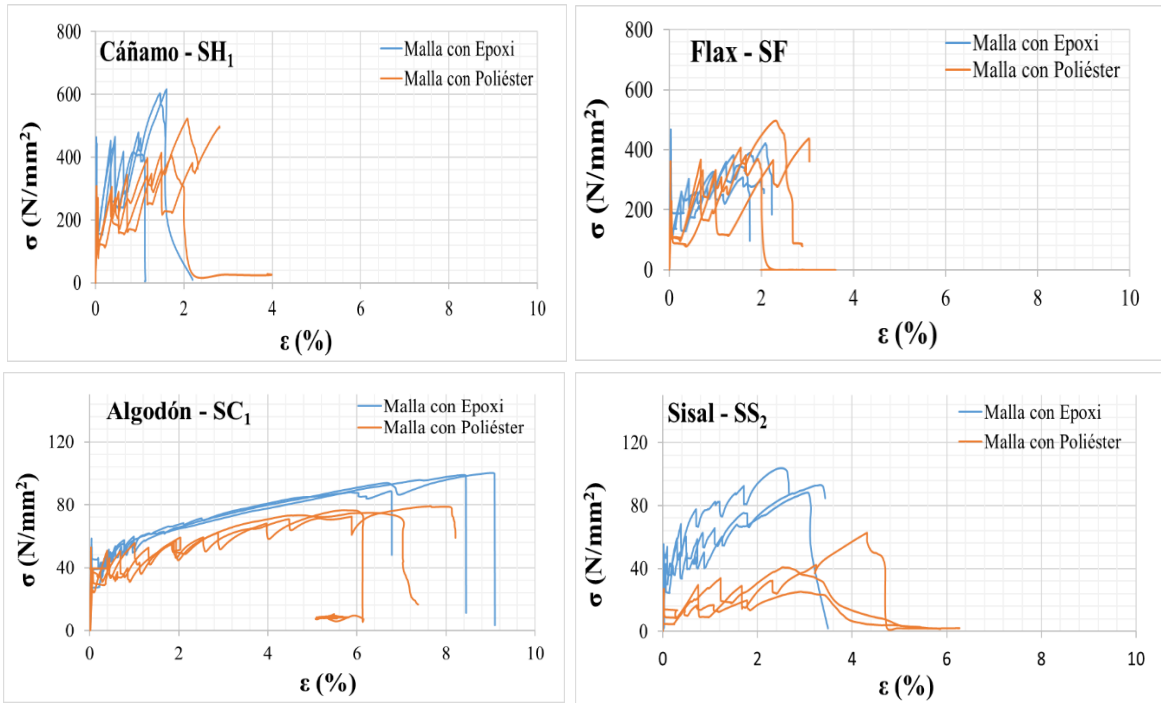


Figura 4.7. Diagramas de esfuerzo-deformación de FRCM: Mallas con epoxi y poliéster

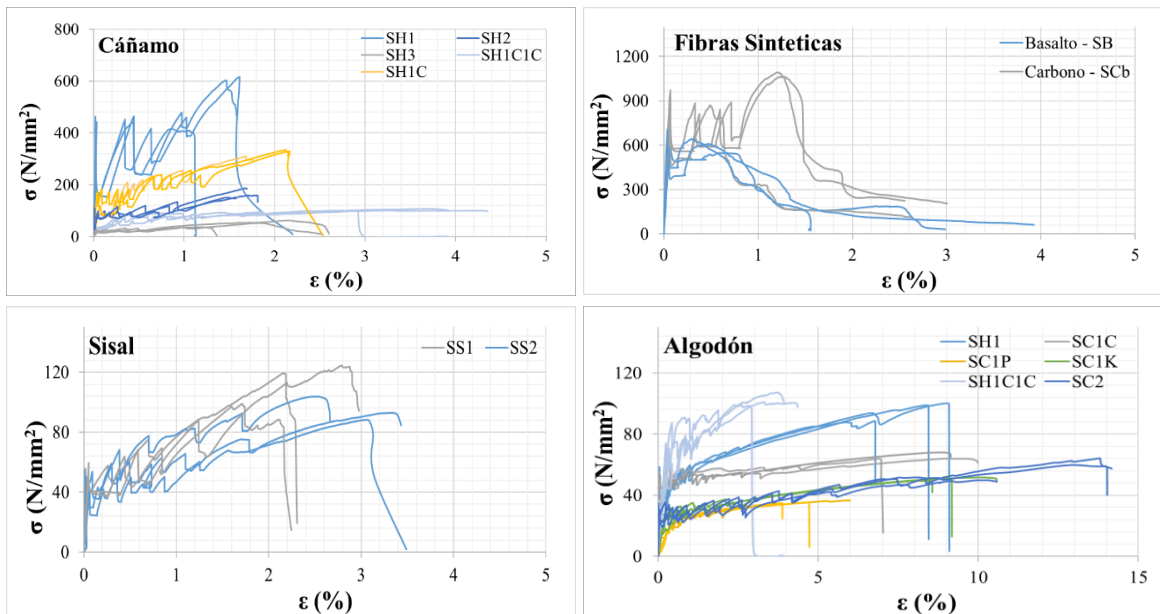


Figura 4.8. Diagramas de esfuerzo-deformación de FRCM: Mallas con epoxi (diferentes espesores y tecnica de tejido), y mallas de fibras sinteticas

4.4. Adherencia de FRCM con con ladrillos

4.4.1. Fabricación de especímenes de FRCM en ladrillo

Con la finalidad de conocer el comportamiento adherente de los FRCM con los ladrillos a utilizar para la fabricación de los muros mostrados más adelante en el capítulo 5, y debido a la importancia que representa la adherencia malla-matriz y matriz-ladrillo para la efectividad de este tipo de refuerzo, se procedió a ensayar especímenes de FRCM adheridos a ladrillos de arcilla cocida.

Para la fabricación de los especímenes de FRCM se crearon marcos de maderas con dimensiones de 5 cm de ancho, 15 cm de largo y 1 cm de espesor, a los cuales se le fue aplicado como desmoldante una fina capa de vaselina.



Figura 4.9. Preparación de especímenes para ensayo de adherencia

Para la elaboración de los especímenes se utilizaron mallas de cáñamo (H1), lino (F), algodón (C1) y basalto (B). Las mallas de fibras vegetales fueron fabricadas según el procedimiento descrito en el apartado 3.3 utilizando poliéster para su impregnación. Para estos ensayos no fueron utilizadas las mallas de elevados espesores debido al fallo por desprendimiento presentado en los ensayos a tracción.

A estas mallas se le fabricaron láminas de FRP de fibra de virio en uno de sus extremos (iguales a los fabricados en los especímenes de hilos), para que estas pudieran ser sujetadas por las pinzas mecánicas de la máquina de ensayo.

También fueron utilizadas las dos matrices caracterizadas anteriormente (Nivoplan y Sika), para analizar la adherencia de las mallas con estas dos matrices, y de las matrices con los ladrillos.

Los moldes eran colocados sobre una de la cara del ladrillo humedecido, para luego colocar una primera capa de mortero de aproximadamente 6 mm y sobre la cual se colocó la malla de 35 cm de forma que quedara adherida a esta primera capa para luego cubrirla con una segunda capa, asegurando un espesor de 1 cm de FRCM, y quedando una longitud libre de la malla de 15 cm (ver Figura 4.10).

Luego del endurecimiento de los especímenes fue adherido sobre la malla con un adhesivo de cianocrilato una pieza en forma de L, sobre la cual era apoyado el LVDT para fines de medir las deformaciones.

4.4.2. Configuración de Ensayo

Luego de 28 días de curado los especímenes mencionados anteriormente eran ensayados en la prensa electromecánica Suzpecar de 50 KN de capacidad, a una velocidad de 0.5 mm/min, y una precarga de 5 N.

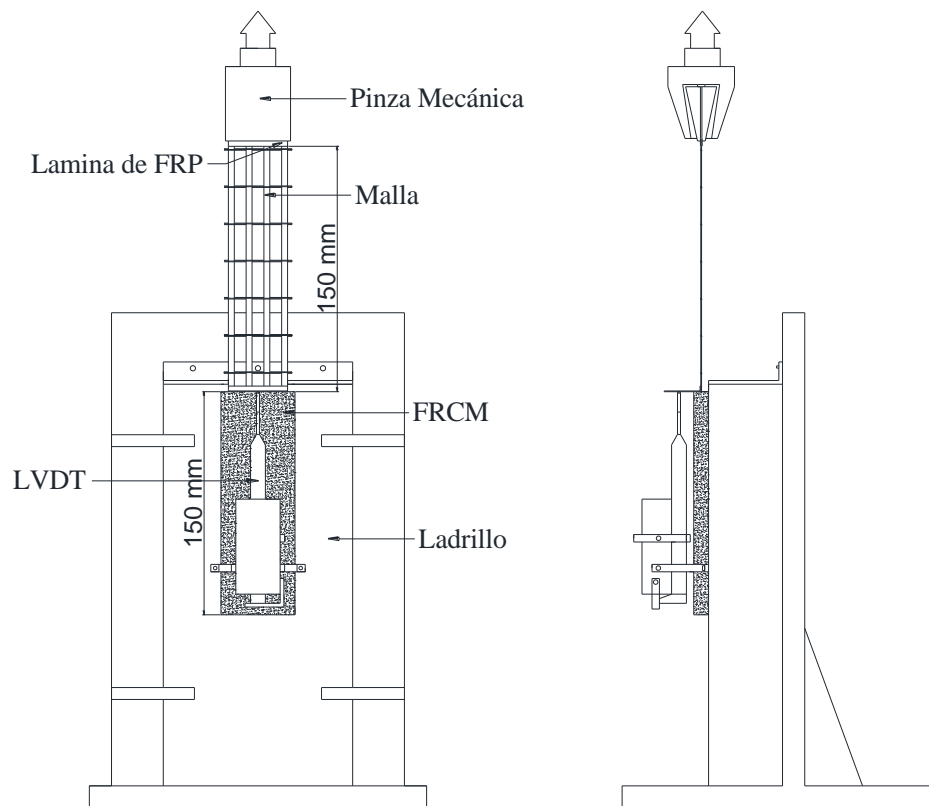


Figura 4.10. Configuración de ensayo de adherencia

Para realizar este ensayo los especímenes eran colocados sobre una pieza metálica en forma de L, restringiendo el desplazamiento vertical del ladrillo, sujetarlo a la pieza metálica para evitar el vuelco del mampuesto, y luego sujetar la malla con la pinza mecánica, utilizando un láser para asegurar la correcta alineación de la malla con la pinza y el espécimen de FRCM.

Luego era colocado un LVDT sujetado al ladrillo y apoyado en la pieza aluminio en forma L adherido a la malla, para medir las deformaciones de los especímenes (ver Figura 4.10).

4.4.3. Resultados y Discusiones

Los especímenes sometidos a ensayos de adherencia presentaron 4 tipos de fallos, los cuales son mostrados y clasificados en la Figura 4.11:

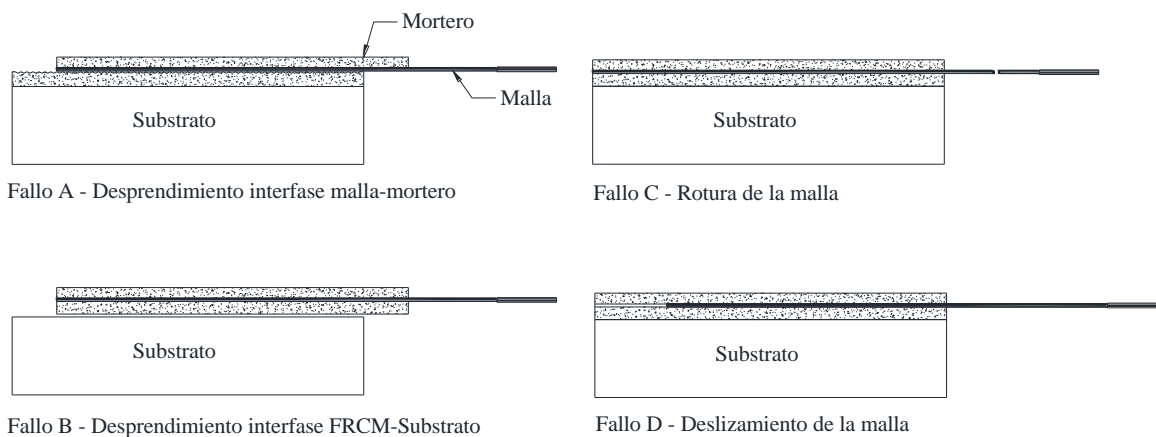


Figura 4.11. Modos de fallos de ensayo de adherencia

Fallo A - por desprendimiento de la interface malla-mortero: fue aquel en que la malla se desprendió del mortero junto con la capa superior del mortero, este fallo ocurre cuando el mortero no es capaz de resistir las tensiones tangenciales transmitidas por la malla, o por el exceso de rigidez de la malla. Este tipo de fallo ocurrió en la mayoría de los especímenes fabricados con mortero Nivoplan, y en algunos casos del mortero Sika.

Fallo B - por desprendimiento de interface FRCM-Substrato: este se presentó cuando el FRCM se desprendió del ladrillo, mostrando una mala adherencia entre el mortero y el sustrato. Según algunos estudios [28] este tipo de fallo también puede estar influenciado por la rigidez de la malla, y con ello del compuesto de FRCM.

Fallo C - por rotura de la malla: este ocurrió cuando la malla alcanzó su tensión de rotura, mostrando una buena adherencia entre malla-matriz y matriz-substrato. Este tipo de fallo solo fue presentado en el caso del FRCM con matriz de Sika.

Fallo D - por deslizamiento de la malla: este ocurrió cuando el fallo final fue por deslizamiento de la malla dentro de la matriz, mostrando con esto una mala adherencia con la matriz. Este tipo de fallo solo fue apreciado en el caso de FRCM con malla de basalto.

Los resultados de los ensayos de adherencia descrito anteriormente son presentados en la Tabla 4.3, donde se presenta las cargas alcanzadas por los especímenes ensayados. Los resultados de las deformaciones medidas por el LVDT no son presentados, debido al deslizamiento de este durante el ensayo.

Tabla 4.3. Resultados de ensayo de adherencia

Mortero	Muestra	Cáñamo		Lino		Algodón		Basalto	
		F (N)	Fallo	F (N)	Fallo	F (N)	Fallo	F (N)	Fallo
Sika	1	2600	A	1860	B	1807	C	1131	D
	2	2810	C	2400	A	2086	C	990	D
	3	2226	A	1830	B	1518	B	882	D
	media (CV)	2545	(9%)	2030	(13%)	1804	(13%)	1001	(10%)
Nivoplan	1	758	B	1273	A	924	B	497	D-A
	2	584	A	1428	A	815	A-D	331	D-A
	3	1335	B	1413	A	643	A	262	D
	media (CV)	892	(36%)	1371	(5%)	794	(15%)	363	(27%)

En la Tabla 4.3 se puede apreciar que los especímenes con mortero Sika que alcanzaron mayores niveles de carga fueron los especímenes de cáñamo, seguido por los de lino, algodón y basalto, una tendencia parecida los resultados de los ensayos de tracción presentados en el apartado 4.3.3.

En el caso de los especímenes de matriz Nivoplan estos siguen presentando una mala interacción con las mallas, alcanzando unos niveles de carga muy inferior a los obtenidos por los especímenes de mortero Sika y fallando en la mayoría de sus casos por desprendimiento del mortero.

Los especímenes presentaron diferentes tipos de fallos para cada tipo de malla, por los que no es posible asociar los tipos de fallo a una malla o matriz en específica. Sin embargo, el caso de deslizamiento solo se produjo en los especímenes de basalto, lo cual confirma en comportamiento mostrado en los ensayos de FRCM a tracción (sección 4.3.3), donde se asume que la malla desliza debido a la mala adherencia con la matriz.

Otro dato a destacar es que la rotura de la malla solo fue alcanzada en los especímenes con mortero Sika, lo cual muestra una buena adherencia de esta matriz con los ladrillos y un mayor aprovechamiento de las propiedades mecánicas de las mallas. Sin embargo, este tipo de fallo no se presentó en los especímenes de Nivoplan donde el fallo predominante fue el fallo por desprendimiento de la malla dentro de la matriz (fallo A), lo cual sigue mostrando la incapacidad de la matriz de soportar los esfuerzos tangenciales transmitidos por la malla.

4.5. Conclusiones

Se llevaron a cabo ensayos de tracción y de adherencia sobre sustrato de FRCM de fibra vegetal recubierta con resina. A raíz de estos ensayos y el análisis de sus resultados se llega a las siguientes conclusiones:

- Los FRCM con mallas recubiertas de epoxi mostraron una mayor eficiencia que los FRCM con malla revestida con poliéster. Este hecho demuestra que la resina epoxi tiene una mejor compatibilidad con la matriz de mortero que el poliéster.
- El FRCM de cáñamo fue el que alcanzó mayores niveles de tensión. Sin embargo, el FRCM de algodón mostró mayor capacidad de alargamiento y un patrón de microfisuras superior a los demás FRCM ensayados.
- El mayor espesor de las mallas de cáñamo y sisal de 2.5 mm provocó una precipitación del inicio de fisuración del mortero y un fallo por desprendimiento más prematuro que los otros especímenes, lo que sugiere que el tipo de fallo del FRCM queda influenciado por las dimensiones relativas entre las fibras y el espesor de la matriz, así como por la rigidez de la malla.
- Las técnicas de tejidos empleados mejoran la interacción malla-matriz pues en todos los casos alcanzaron más del 100% del rendimiento mecánico de los mechones, presentando un mayor rendimiento dentro del FRCM que los mechones sin tejer.
- La tendencia de fallo por desprendimiento entre la malla y el mortero presentado en los especímenes de matriz de Nivoplan, demuestran la incapacidad de esta matriz de absorber las tensiones tangenciales transmitidas por mallas.
- La matriz de Sika mostró una mayor adherencia con las mallas y los ladrillos que los de matriz de Nivoplan, pues en algunos casos se alcanzó la rotura de la malla en los especímenes con mortero Sika. Pues las mejores propiedades mecánicas del mortero Sika hizo que esta matriz fuera más efectiva para absorber las tensiones tangenciales transmitidas por las mallas en los ensayos de tracción y adherencia, alcanzando mayores niveles de cargas y mejor compatibilidad con todas las mallas utilizadas.
- El recubrimiento de las mallas de fibras vegetales con resina parece mejorar la adherencia con el mortero mostrando un comportamiento de microfisuras y alcanzando unos niveles de cargas superiores a los especímenes reforzados con basalto y carbono. Lo que sugiere la posibilidad de que los FRCM de fibras vegetales puedan alcanzar propiedades mecánicas comparables o superiores a los FRCM de fibras sintéticas.

Capítulo V. Estudio experimental de muros de mampostería reforzados con FRCM de fibras vegetales sometidos a ensayos de carga cíclica

5.1. Introducción

El comportamiento de las estructuras de mampostería ante acciones sísmica ha sido un tema muy investigado en los últimos años, pues los grandes daños evidenciados en este tipo de estructura después de un sismo, han hecho necesario estudiar su comportamiento ante acciones sísmica, y así también la búsqueda de métodos o técnicas de refuerzo útiles para mitigar o evitar los daños por acciones dinámicas.

El FRCM surge como una opción a considerar para el refuerzo de este tipo de estructura. Sin embargo, el uso de esta técnica se ve limitado por el coste y la afectación medioambiental de la producción de las mallas sintéticas comúnmente utilizadas en estos compuestos. Además, debido a la rigidez que presentan estas fibras, la capacidad de disipar energía de este tipo de refuerzo se ve limitada. En este sentido, el presente capítulo pretende utilizar FRCM de fibras vegetales (más sostenibles y menos rígidas que la sintéticas) como técnica de refuerzo en muros de mampostería sometidos a cargas cíclicas.

Atendiendo a los resultados experimentales obtenidos de los FRCM de fibras vegetales presentados y analizados en el Capítulo IV, Se eligieron los tipos de fibras, la geometría de las mallas y la matriz cementicia a utilizar en el refuerzo de muros de mampostería, para luego ensayarlos a carga cíclica.

En este capítulo se describe los procedimientos de fabricación de los especímenes de muros y la configuración del ensayo al cual fueron sometidos, para luego analizar e identificar el aporte de los refuerzos de FRCM de fibras vegetales y de fibra de vidrio (como elemento de contraste) al comportamiento bajo cargas cíclicas de muros de mampostería.

5.2. Materiales

5.2.1. Ladrillos

Para la fabricación de los muros se utilizaron ladrillos industriales suministrados por la empresa Calvente Hermanos, S.A. Las dimensiones nominales de estos ladrillos eran de 50×128×270 mm.

Las propiedades mecánicas de estos ladrillos se presentan en la Tabla 5.1. Estas propiedades fueron determinadas mediante ensayos de flexión y compresión en un estudio previo realizado en LITEM [67].

Tabla 5.1 Resultados de las pruebas en ladrillos

Ladrillo	Geometría	Tensión de flexión	Tensión ultima	Resistencia a compresión
		(MPa)	(MPa)	(MPa)
L	50×128×270	4.37 (28%)	2.81 (28%)	27.93 (19%)

() Coeficiente de variación

5.2.2. Morteros

Juntas: para las juntas en los muros de mampostería se utilizó el mortero Biocalce Muro un mortero eco-compatible de cal natural pura NHL 3.5, conforme a la norma EN 459-1[68], para la ejecución y reparación transpirable de muros, idóneo para la restauración de obras histórica.

Para comprobar sus propiedades mecánicas este fue sometido a los ensayos de flexión y compresión según el procedimiento descrito en el apartado 3.4. Como resultado de estos ensayos se obtuvo una resistencia a flexión promedio de 3.73 MPa, a tracción por flexión de 1.65 MPa, y a compresión de 4.68 MPa.

FRCM: para el refuerzo de los muros con FRCM se utilizó el mortero de reparación Sika ya descrito en el apartado 3.4, pues fue la matriz de mejores prestaciones durante la caracterización del FRCM a tracción.

5.2.3. Mampostería

Las propiedades mecánicas de muros de mamposterías construidos con los ladrillos mencionados anteriormente son presentadas en la Tabla 5.2. Estos valores fueron obtenidos de otros estudios realizados en LITEM [69][70]. En estos se realizaron ensayos de compresión, ensayos de adherencia y ensayos a cortante de la mampostería (realizados según las normas ASTM C1072 - 13 [71] y UNE-EN 1052-3:2003 [72]). Los valores presentados en esta tabla fueron utilizados en los modelos analíticos y numéricos presentados en los capítulos 6 y 7.

Tabla 5.2. Propiedades de mampostería

Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de deformabilidad (MPa)	Adherencia ladrillo-mortero (MPa)	Resistencia a cortante (MPa)	Coefficiente de fricción (/)
10.8 (23%)	1.61 (23%)	780 (38%)	0.36 (18%)	0.17	0.73

(/) Coeficiente de variación

Los valores de resistencia a cortante (0.17 MPa) y coeficiente de fricción (0.73) fueron obtenidos de la regresión lineal obtenida a partir de 8 ensayos experimentales.

5.2.4. Mallas

Con el objetivo de comparar el comportamiento de mallas de fibras vegetales con alguna malla de fibra sintética, se elaboraron mallas de fibras vegetales para reforzar los muros, y se utilizó una malla comercial de fibra de vidrio, pues es una de las fibras sintética más utilizada en estos tipos de refuerzo.

Para la elaboración de las mallas de fibras vegetales fue utilizado el mismo proceso descrito en el apartado 3.3, con la excepción de que el molde utilizado en este caso tenía unas dimensiones de 90 × 90 cm y los clavos estaban distanciado 3 cm en dirección de urdimbre y 4 cm en dirección de la trama, esto con la finalidad de aumentar las cuadrículas de las mallas, y así permitir un mayor paso del mortero a través de la malla, y a la vez reducir la rigidez de esta. Esta geometría fue adoptada considerando la geometría de la malla comercial de fibra de vidrio alcalí resistente (cuyos mechones fueron caracterizados en el capítulo 3). Las geometrías y fabricación de estas mallas son mostradas en la Figura 5.1.

Se elaboraron 8 malla de fibras vegetales, 4 fueron de cáñamo (hilo H1) descrito en el apartado 3.2, con mechones de 12 hilos, y 4 fueron de algodón (hilo C1) también caracterizado en el mismo apartado, con mechones de 6 hilos. Esto debido a que los FRCM de cáñamo fueron los que alcanzaron mayores niveles de tensiones y los de algodón fueron los que mostraron mayor capacidad de alargamiento y multifisuras (ver capítulo 4).

La resina utilizada para la impregnación de estas mallas fue la resina epoxi descrita en el apartado 3.2.1, según la proporción indicada en el apartado 3.2.2 para las mallas de cáñamo y algodón. Esto por la buena interacción que mostró esta resina en los resultados de los especímenes de FRCM a tracción (capítulo 4).

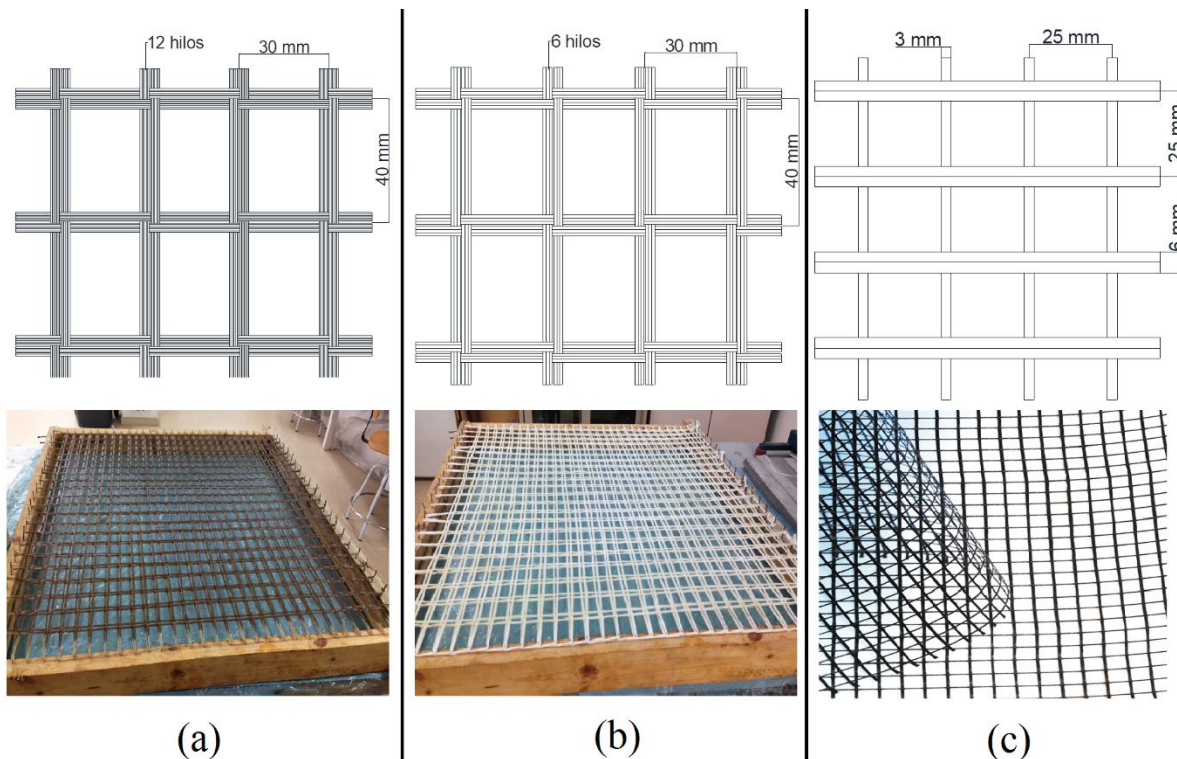


Figura 5.1. Mallas de Refuerzo: (a) Malla de Cáñamo, (b) Malla de Algodón, (c) Malla de fibra de vidrio (Mapegrid G220)

Tabla 5.3 Propiedades de las mallas

Mallas	Cáñamo		Algodón		Vidrio	
	U	T	U	T	U	T
Dirección de mechones						
Espesor equivalente (mm)	0.08	0.06	0.24	0.18	0.04	0.04
Hilos/mechón (-)	12		6		-	
Resistencia a tracción de mechones (MPa)	520.76	520.76	91.95	91.95	674.29	679.2
Resistencia a tracción de malla (KN/m)	40.88	30.66	32.48	24.36	28.32	28.53
Deformación unitaria (%)	1.30		7.81		1.22	
Peso/área (g/m ²)	520		771		225	

Atendiendo a la geometría adoptada en las mallas (Figura 5.1) y al área de sección transversal de cada mechón fue posible determinar el espesor equivalente de cada malla (con excepción de la malla comercial cuyo espesor fue dado por el fabricante). Por otro lado, a través de la caracterización de los hilos y mechones en el capítulo 3, fue posible determinar la resistencia a tracción por metro lineal de malla en cada dirección. Y el peso de la malla

revestida por metros cuadrado de superficie fue determinado a partir del peso de la malla en una báscula de precisión. Estas propiedades son mostradas en la Tabla 5.3.

5.3. Diseño, construcción y refuerzo de los muros

Se diseñaron muros de 90×100 cm con los ladrillos industriales mencionados en el apartado 5.2.1. Estos fueron elaborados sobre un elemento de manipulación metálico, que también fue colocado en la parte superior (ver Figura 5.2). Estos sirvieron como base y cabezal de los muros, para facilitar el movimiento de los muros, y como elemento de sujeción adaptado a la configuración del ensayo.

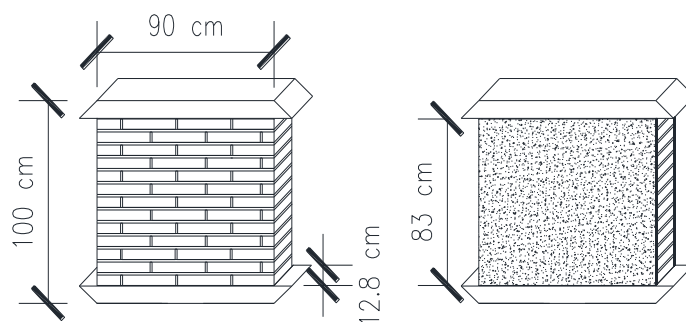


Figura 5.2. Geometrías de muros de mampostería

Se construyeron 10 muros de 90×100 cm, de los cuales 2 fueron reforzados con FRCM de cáñamo, 2 con FRCM de algodón, 2 con FRCM de vidrio, 2 solo con mortero y 2 quedaron sin reforzar. La Nomenclatura utilizada para diferenciar cada uno de los muros se presenta en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Nomenclatura de especímenes de muros

	Fibra de refuerzo	Altura (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	Área reforzada (cm)
WN1	Sin reforzar	100	90	12.8	90 x 83
WN2	Sin reforzar	100	90	12.8	90 x 83
WMN1	Solo mortero	100	90	14.8	90 x 83
WMN2	Solo mortero	100	90	14.8	90 x 83
WH1	Cáñamo	100	90	14.8	90 x 83
WH2	Cáñamo	100	90	14.8	90 x 83
WC1	Algodón	100	90	14.8	90 x 83
WC2	Algodón	100	90	14.8	90 x 83
WG1	Vidrio	100	90	14.8	90 x 83
WG2	Vidrio	100	90	14.8	90 x 83

Para aplicar los refuerzos de FRCM a los muros, primero se humedeció la cara a reforzar para luego aplicar la primera capa de mortero sobre la cual luego se colocó la malla de forma que quedara adherida al mortero (ver Figura 5.3), y así luego finalizar cubriendo la malla con otra capa de mortero dejando la malla embebida en el mortero de refuerzo.



Figura 5.3. Reforzamiento de muros

5.4. Configuración del ensayo de carga cíclica

El tipo de ensayo elegido para someter los muros fue el ensayo de carga cíclica [73], esto por el interés de presentar el refuerzo con FRCM de fibras vegetales como una opción de refuerzo de edificaciones de mampostería ubicados en zonas de alta sismicidad.

El ensayo consistió en restringir los desplazamientos horizontales en la parte superior del muro, permitiendo el desplazamiento en la parte inferior, para luego aplicarle una carga distribuida de compresión en la parte superior, y luego un desplazamiento cíclico lateral en el plano en uno de los extremos de la parte inferior del muro. Esto con el objetivo de determinar la capacidad de disipar energía, la ductilidad y la resistencia a fuerza cortante cíclica de los muros a ensayar.

Para poder desarrollar este ensayo se procedió a diseñar y realizar la siguiente configuración:

- 1) Se colocó el muro a ensayar en dos patines de carga sobre un marco metálico de 2.3×2.14 m, para permitir el desplazamiento en la parte inferior del muro (ver Figura 5.4).
- 2) Se colocaron dos topes laterales en la parte superior del muro, uno de 25.5 cm en el lado izquierdo y otro de 1.2 m en el lado derecho del muro, ambos con láminas de caucho en los puntos de contacto con el muro para mitigar los daños por fricción en estos puntos. Todo esto con el fin de restringir los desplazamientos en la parte superior del muro a ensayar (ver Figura 5.4).
- 3) Se le colocaron sobre el muro dos marcos transversales en dirección vertical en los extremos laterales del muro. Cada marco estaba compuesto por un perfil metálico

unido a dos células de cargas de 100 KN que a su vez se conectaban a dos barras metálicas de 27 mm de diámetro, que se anclaban en el soporte metálico sobre el que se apoyaba el muro a través de los patines. Estos marcos fueron colocados con el objetivo de impedir la rotación del muro en su plano durante el ensayo (ver Figura 5.4).

- 4) En la parte inferior se colocó otro marco alrededor del muro, el cual conectaba el muro con el sistema de aplicación del desplazamiento cíclico. Este marco consistió en dos pequeños perfiles metálicos (uno en cada extremo lateral) en contacto con el muro con una lámina de caucho entre ellos, unidos a la base metálica de los muros y a dos barras de acero de 16 mm de diámetro que a su vez conectaban con el sistema de carga cíclica. Esto permitió la aplicación de los desplazamientos cíclicos en la parte inferior del muro. Debido a la colocación de este marco y a los topes mencionados anteriormente como limitantes del desplazamiento en la parte superior del muro, la altura efectiva del muro se redujo a 700 mm (ver Figura 5.4).
- 5) Se colocaron 3 potenciómetros LWR, uno en diagonal (LWR1) de 500 mm de alcance en una de las caras del muro, otro también de 500 mm en diagonal (LWR2) en la otra cara del muro y cubriendo la diagonal opuesta al primero, y otro en la parte inferior del muro, del lado opuesto al punto de aplicación de la sollicitación cíclica. Esto para registrar los desplazamientos y deformaciones aplicadas al muro (ver Figura 5.4).
- 6) Sistema de aplicación de la sollicitación cíclica: debido a que no había espacio para colocar el actuador MTS de 250 KN en el marco metálico sobre el cual se colocó el muro, fue necesario colocar el actuador en dirección contraria al muro, para luego armar una estructura en forma de marco que conectaba la cabeza del actuador con el muro. Esta estructura estuvo compuesta por 2 perfiles metálicos de 3 m de longitud y dos placas metálicas de 3 cm de espesor, que se unían por piezas metálicas en forma de L mediante tornillos de alta resistencia de 20 mm de diámetro (ver Figura 5.4).
- 7) Una vez el muro estaba en posición de ensayo y unido a la estructura de aplicación de la sollicitación cíclica, a este se le aplicó una carga vertical de 25 KN con un actuador MTS de 50 KN a través de un perfil metálico UPN 80. Luego de esto, los marcos colocados para evitar el giro eran ajustados (ver Figura 5.4).
- 8) Como adquisidor de datos se utilizó un HBM MGC plus, al cual se conectaron los 3 LWR, las 4 células de carga y la señal de fuerza de los 2 actuadores (ver Figura 5.4).
- 9) Luego de aplicar la carga vertical y conectar los sensores, se procedía a comenzar el ensayo aplicando un desplazamiento cíclico con el actuador MTS de 250 KN, a una velocidad de 1 mm/s. La velocidad de ensayo y los ciclos de cargas utilizados en este ensayo fueron basados en la norma ASTM-E-2126-02a [73]. Ciclos de carga-aplicados se muestran en la Figura 5.5. En el anexo B se presentan las imágenes que muestran esta configuración de ensayo de una forma más detallada.

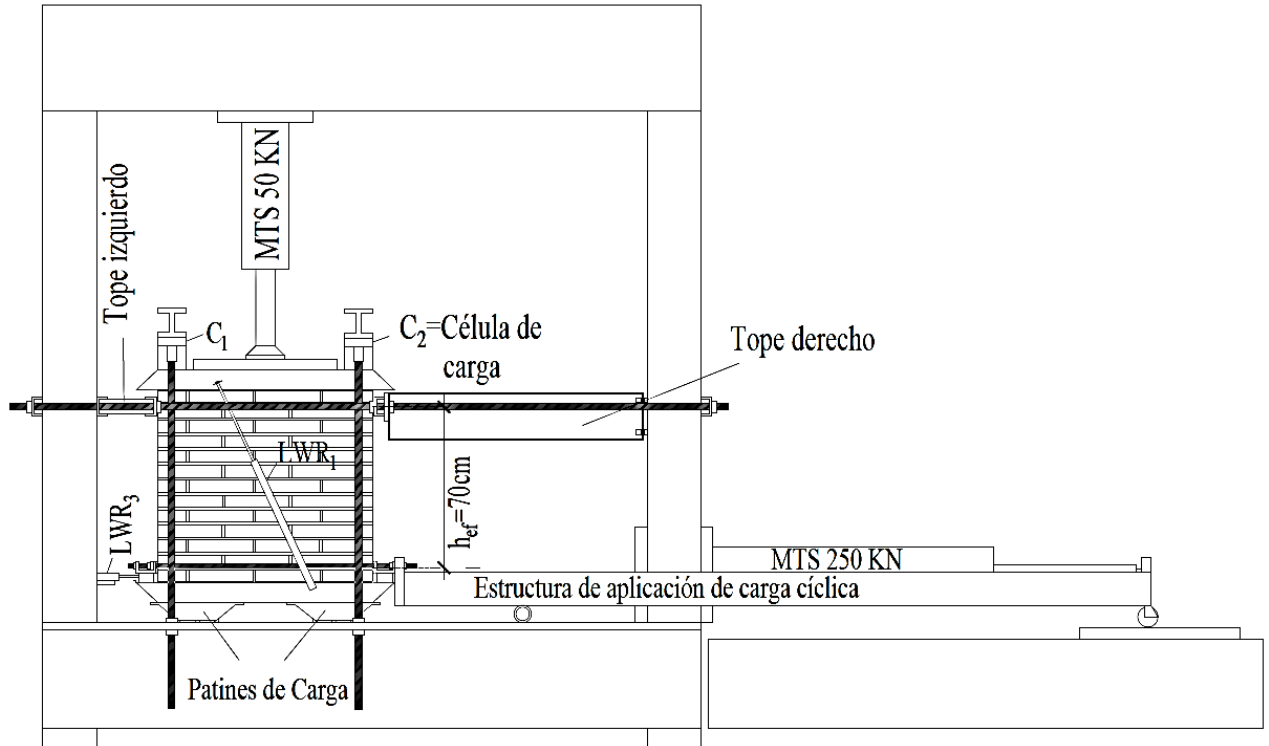


Figura 5.4. Configuración de ensayo por carga cíclica

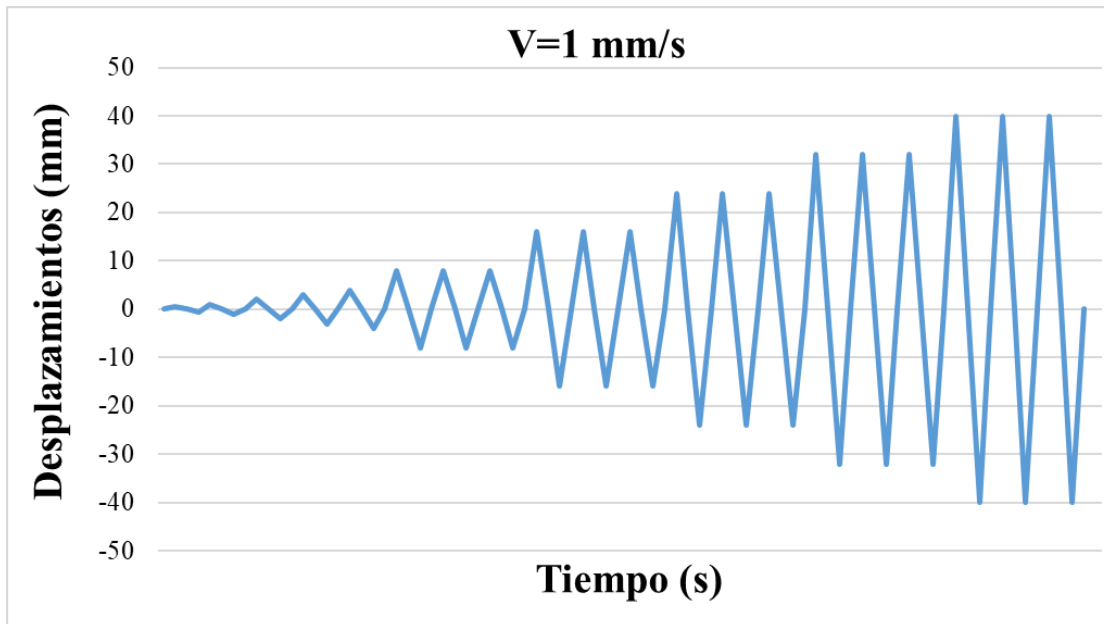


Figura 5.5. Desplazamientos Impuestos

5.5. Análisis y Discusiones

Una vez se elaboraron y reforzaron los muros, estos fueron sometidos al ensayo por carga cíclica descrito en la sección 5.4 luego de aproximadamente 6 meses de curado, para identificar si ocurría alguna degradación de las fibras durante este periodo de tiempo, y para que el mortero de cal utilizado en las juntas desarrollara mejor sus propiedades mecánicas. A continuación, se describe el comportamiento de estos muros durante el ensayo, los parámetros que describen este comportamiento, y el análisis de estos.

5.5.1. Tipos de fallos

Fallo de muros sin reforzar (WN), reforzados solo con mortero (WMN) y reforzados con FRCM de fibra de vidrio (WG): en estos el fallo se produjo por cortante formándose dos grandes grietas en diagonal (Figura 5.6). En el caso de los muros sin refuerzos se observó una rotura mixta (junta y ladrillo), pero sobre todo ubicada en las juntas, y en los casos de los muros reforzados solo con mortero y FRCM de fibra de vidrio, se observó una rotura más continua, motivada por el confinamiento aportado por el refuerzo. En el caso de los muros reforzados con fibra de vidrio se pudo apreciar la rotura de la malla.



Figura 5.6. Fallos de especímenes: WN, WNM y WG

Fallos de muros reforzados con FRCM de fibras vegetales: En estos muros se produjeron fisuras distribuidas en diagonal a través del refuerzo, y al final hubo desprendimiento del refuerzo próximo a las esquinas de los muros, donde se observaron fallos locales de la mampostería (ver Figura 5.7).

La forma en que se presentaron las fisuras en estos especímenes, indican una mayor distribución de las tensiones en el refuerzo, así como también la posibilidad de disipar mayor energía a través de estas fisuras (como se puede apreciar más adelante). Sin embargo, el

hecho de que haya visto desprendimiento del refuerzo, puede indicar que el volumen de fibras utilizado haya mejorado tanto la conexión con la matriz [27], hasta el punto de superar la conexión de la matriz con la mampostería, provocando una separación de cuerpos (mampostería-FRCM) a las tensiones de fallo alcanzada. Esto puede indicar la necesidad de recurrir a métodos de anclaje [15][16], para mejorar la conexión entre FRCM y mampostería. En el anexo B se presentan las imágenes de fallo de todos los muros ensayados.



Figura 5.7. Fallos de especímenes: WH y WC

5.5.2. Propiedades mecánicas de muros bajo carga cíclica

A raíz de los ensayos de los muros reforzados y sin reforzar se obtuvieron los datos de cargas cíclicas aplicadas y desplazamientos impuestos. Estos datos son representados en los diagramas de histéresis, los cuales definen el comportamiento característico de estos tipos de muros cuando están sometidos a cargas cíclicas. Estos diagramas de histéresis son presentados en la Figura 5.8 representados por la relación entre fuerza y distorsión (desplazamiento/altura efectiva), donde la altura efectiva es igual a 700 mm (ver Figura 5.4). Estos fueron hechos a partir del cálculo promedio de los 2 muros ensayados por cada tipo de espécimen (el anexo B se presentan los resultados para cada muro).

En los diagramas de histéresis se puede observar un comportamiento parecido en todos los casos, donde se observa un incremento progresivo de la abertura entre las curvas de histéresis, el cual corresponde a la continua degradación de la rigidez de los muros a medida que aumentan los ciclos de histéresis.

La Figura 5.8. también se muestra la comparación de las curvas envolvente promedio de los diagramas de histéresis de cada muro. En esta se puede observar envolventes bastantes

abiertas, y que finalizan con una caída repentina de carga al llegar al desplazamiento máximo alcanzado por cada muro.

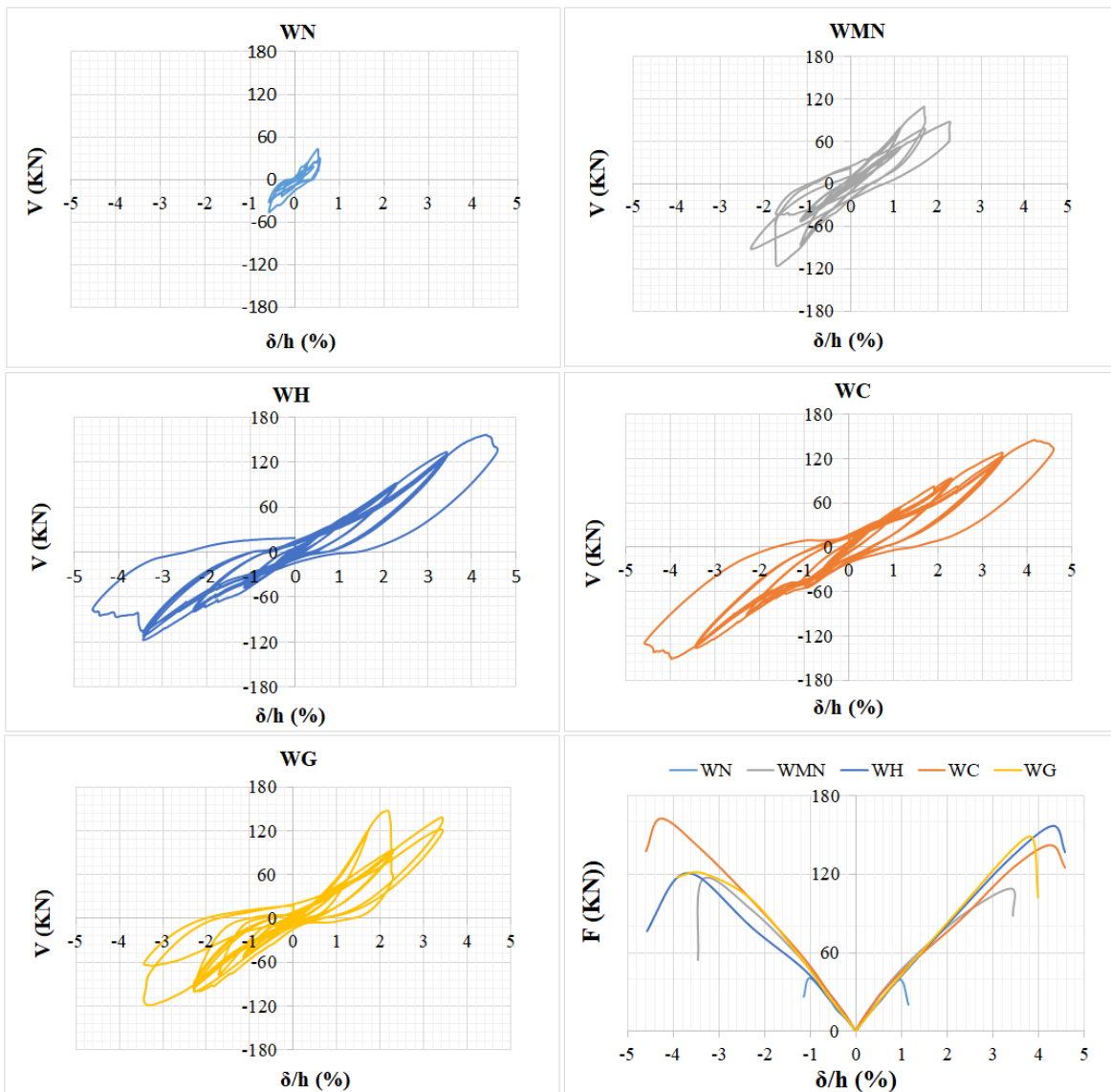


Figura 5.8. Diagramas de histéresis y curvas envolventes

A continuación en la Figura 5.9 se muestran un esquema representativo de las propiedades calculadas a partir de una curva de histéresis definida por la envolvente y el modelo bilineal idealizado. A partir de este esquema fue posible determinar los parámetros comúnmente utilizados para definir y analizar el comportamiento de muros sometidos a cargas cíclicas.

El modelo bilineal adoptado en este estudio fue el presentado por [74], este fue elegido porque las curvas envolventes fueron muy abiertas, y con una caída bastante brusca una vez

alcanzo la tensión máxima (ver Figura 5.8). Este modelo está definido por un cortante de fisuración equivalente a 75 % del cortante máximo (V_{max}), el cortante máximo, el cortante último equivalente $0.80V_{max}$, a partir del cual se asume el fallo total de la estructura, el desplazamiento de fisuración (δ_c), desplazamiento efectivo (δ_e) correspondiente a la extrapolación del estado límite de fisuración, el desplazamiento donde se alcanza el cortante máximo (δ_{max}), y el desplazamiento último correspondiente al cortante último (δ_u). Para este caso de estudio el valor del cortante último se consideró igual al cortante máximo, debido a la caída brusca de carga una vez se alcanzó el cortante máximo.

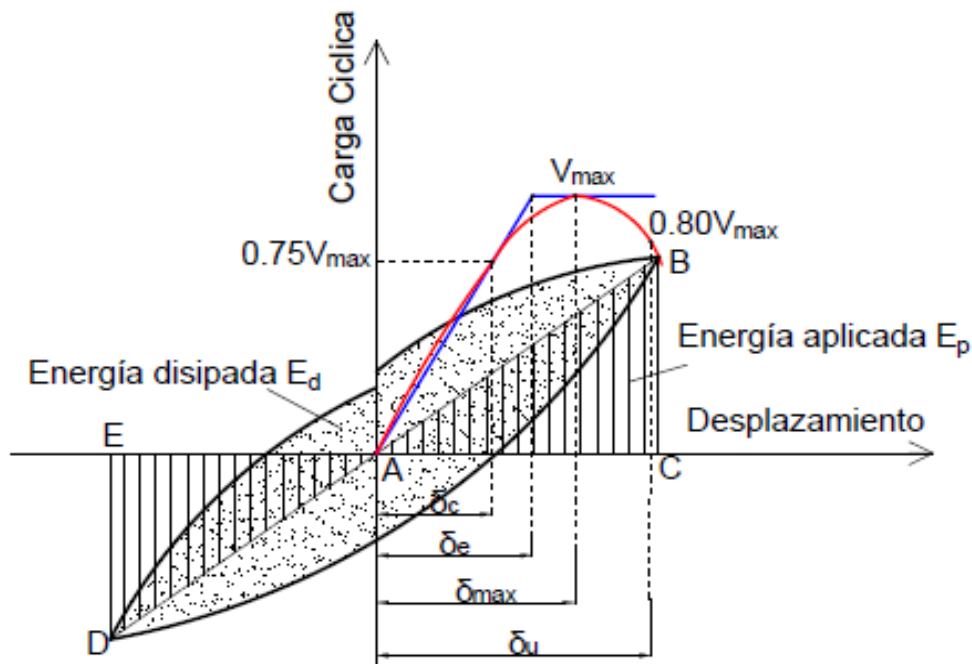


Figura 5.9. Detalle de modelo bilineal, y definición de energías[74][75].

Los resultados de los ensayos por carga cíclicas son mostrados en la Tabla 5.5. En esta tabla se presenta la fuerza cortante máxima y el desplazamiento máximo alcanzado por cada muro (V_{max} y δ_{max}), la relación desplazamiento máximo y altura efectiva del espécimen (δ_{max}/h), así también la carga correspondiente al 75 % del cortante máximo, y el desplazamiento en este punto (δ_c) a partir de los cuales fue posible determinar la rigidez elástica a cortante (K_e). También se presenta la energía total disipada (E_d), el factor de ductilidad (μ), y la variación en por ciento (Δ) de todas las propiedades analizadas para los muros reforzados con respecto a los muros sin reforzar.

Tabla 5.5. Resultados de ensayos por carga cíclica

Muestra	V_{max} (KN)		$0.75V_{max}$ (KN)		δ_{max} (mm)		δ_{max}/h (%)	δ_c (mm)		K_e (KN/mm)		E_d (KN/mm)		μ (/)		
	1	2	1	2	1	2		1	2	1	2	1	2	1	2	
Sin Refuerzo	WN	45.56	35.52	34.17	26.64	7.95	6.11		4.13	4.27	8.27	6.22	498.75	470.37	1.93	1.43
	Media	40.54		30.40		7.03		1.00	4.20		7.25		484.56		1.68	
	(CV)	(12.39%)		(7.07%)		(13.12%)			(0.82%)		(8.23%)		(1.51%)		(14.74%)	
Solo Mortero	WMN	116.22	95.52	87.16	71.64	23.50	15.82		15.30	9.51	5.7	7.54	4742.70	1965.63	1.54	1.66
	Media	105.87		79.40		19.65		2.81	12.39		6.62		3354.15		1.60	
	(CV)	(9.78%)		(5.42%)		(19.47%)			(15.16%)		(6.07%)		(35.32%)		(3.97%)	
	Δ	161.15%		161.15%		179.47%			194.93%		-8.62%		592.20%		-4.59%	
FRCM Caano	WH	146.08	167.06	109.56	125.29	30.17	30.28		20.58	20.49	5.32	6.12	8049.21	9752.38	1.47	1.48
	Media	156.57		117.43		30.22		4.32	20.53		5.72		8900.79		1.47	
	(CV)	(6.7%)		(3.14%)		(0.18%)			(0.11%)		(3.24%)		(4.37%)		(0.40%)	
	Δ	286.22%		286.22%		329.85%			388.79%		-21.07%		1736.88%		-12.27%	
FRCM Algodón	WC	164.60	160.10	123.45	120.10	30.63	29.03		22.22	19.51	5.55	6.15	9752.38	10810.84	1.38	1.49
	Media	162.35		121.76		29.83		4.26	20.86		5.85		10281.61		1.43	
	(CV)	(1.38%)		(0.70%)		(2.68%)			(3.47%)		(2.43%)		(2.45%)		(3.81%)	
	Δ	300.47%		300.47%		324.30%			396.74%		-19.25%		2021.84%		-14.58%	
FRCM Vidrio	WG	147.45	148.00	110.6	111.00	30.40	23.87		20.20	17.80	5.50	6.25	8659.70	5565.89	1.50	1.34
	Media	147.73		110.79		270.13		3.88	19.01		5.85		7112.77		1.42	
	(CV)	(0.19%)		(0.09%)		(12.04%)			(3.48%)		(3.15%)		(13.90%)		(5.58%)	
	Δ	264.4%		264.40%		285.93%			352.56%		-19.21%		1367.88%		-15.24%	

5.5.2.1. Rigidez elástica (K_e)

Es la rigidez elástica de corte definida por la pendiente de la secante que pasa del origen a un punto en la curva envolvente donde la carga es igual al 75% del cortante máximo. Por lo que la rigidez elástica puede ser determinada a partir de la siguiente formula:

$$K_e = \frac{0.75V_{max}}{\delta_c} \quad (5.1)$$

Donde δ_c es el desplazamiento equivalente a la carga de fisuración ($0.75V_{max}$)

Los resultados de la rigidez elástica mostrados en la Tabla 5.5, muestran una reducción de esta en todos los muros reforzados, sobre todo en los reforzados con FRCM, esto se debe la mayor capacidad de deformación y de disipación de energía que le ofrece el refuerzo con

FRCM. Esta diferencia de rigidez entre cada tipo de especímenes puede ser mejor apreciada en la Figura 5.10, donde se muestran los modelos bilineales correspondientes a cada tipo de especímenes.

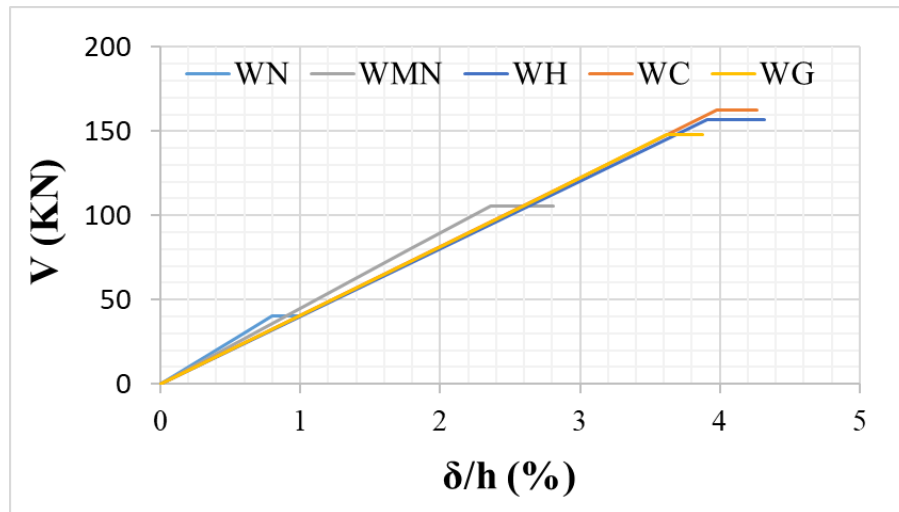


Figura 5.10. Comparación de modelos bilineales

5.5.2.2. Energía total disipada

La energía disipada es la pérdida de energía de una estructura durante el período de tiempo en el cual está sometida a cargas dinámicas. Esta es equivalente al área encerrada en los ciclos de histéresis (ver Figura 5.9). Por lo que la energía total disipada (E_{td}) se determinó a partir de la sumatoria de la energía disipada por cada ciclo de carga (E_{di}).

$$E_{td} = \sum_{i=1}^n E_{di} \quad (5.1)$$

Los principales datos a destacar de los presentados en la Tabla 5.5, son los grandes incrementos de resistencia a cortante y de capacidad de disipar energía que les aportaron los refuerzos a los muros de mampostería. Estos incrementos se aprecian mejor en la Figura 5.11.

En la Figura 5.11 se puede ver como de los muros reforzados los que alcanzaron mayor resistencia a cortante fueron los reforzados con FRCM de algodón, seguido por el cáñamo, el de vidrio y el reforzado solo con mortero, este es el mismo orden en el caso de la energía disipada. También se aprecia como el refuerzo solo con mortero es capaz de aumentar la resistencia a cortante en 116 %, sin embargo, cuando esta reforzado con mallas (FRCM) esta aumenta considerablemente su resistencia a cortante (264-300 %), y su capacidad de disipar energía (1368-2022%).

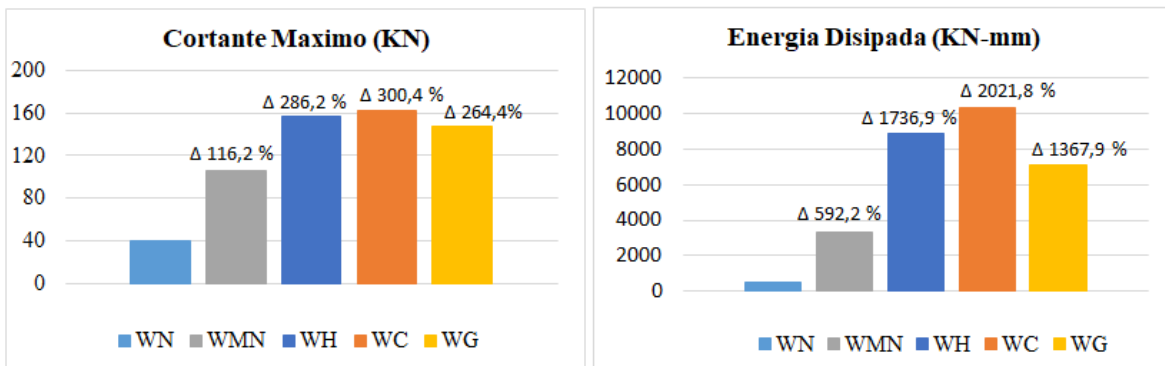


Figura 5.11. Variación de cortante máximo y energía disipada

Los resultados presentados en la Figura 5.11 muestra buena efectividad de los refuerzos con fibras vegetales. Esta muestra también que a pesar de que la malla de cáñamo es más resistente que la de algodón, el FRCM de algodón pudo alcanzar mayores niveles de carga y pudo disipar mayor energía que esta. Esto puede ser debido a la capacidad de alargamiento de las mallas de algodón, pues el hecho de que estas mallas tengan una mayor capacidad de deformación que las mallas de cáñamo y fibra de vidrio, le permitió disipar más energía.

5.5.2.3. Factor de ductilidad

La ductilidad de una estructura está definida por la capacidad que tiene esta de deformarse una vez a cruzado la zona elástica. Según estudios anteriores [75], existen muchos métodos para determinar la ductilidad de una estructura, Por lo que en el presente estudio esta fue determinada a partir de la relación entre la deformación máxima (debido la rotura frágil una vez alcanzada la carga máxima) y el desplazamiento equivalente al 75 % del cortante máximo (ver ecuación 5.2).

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_c} \quad (5.2)$$

En la mayoría de las propiedades analizadas en la Tabla 5.5 se presenta un incremento de estas en los muros reforzados con relación a los muros sin reforzar, con excepción del factor de ductilidad y rigidez. Esto debido a que, en el caso de los muros reforzados, el valor de δ_c aumenta bastante en comparación al valor de δ_c de los muros sin reforzar. Pero tomando en consideración el incremento de δ_{max} en los muros reforzados con relación a los muros sin reforzar, se puede observar un elevado incremento de la capacidad de distorsión de los muros (179 a 330 %).

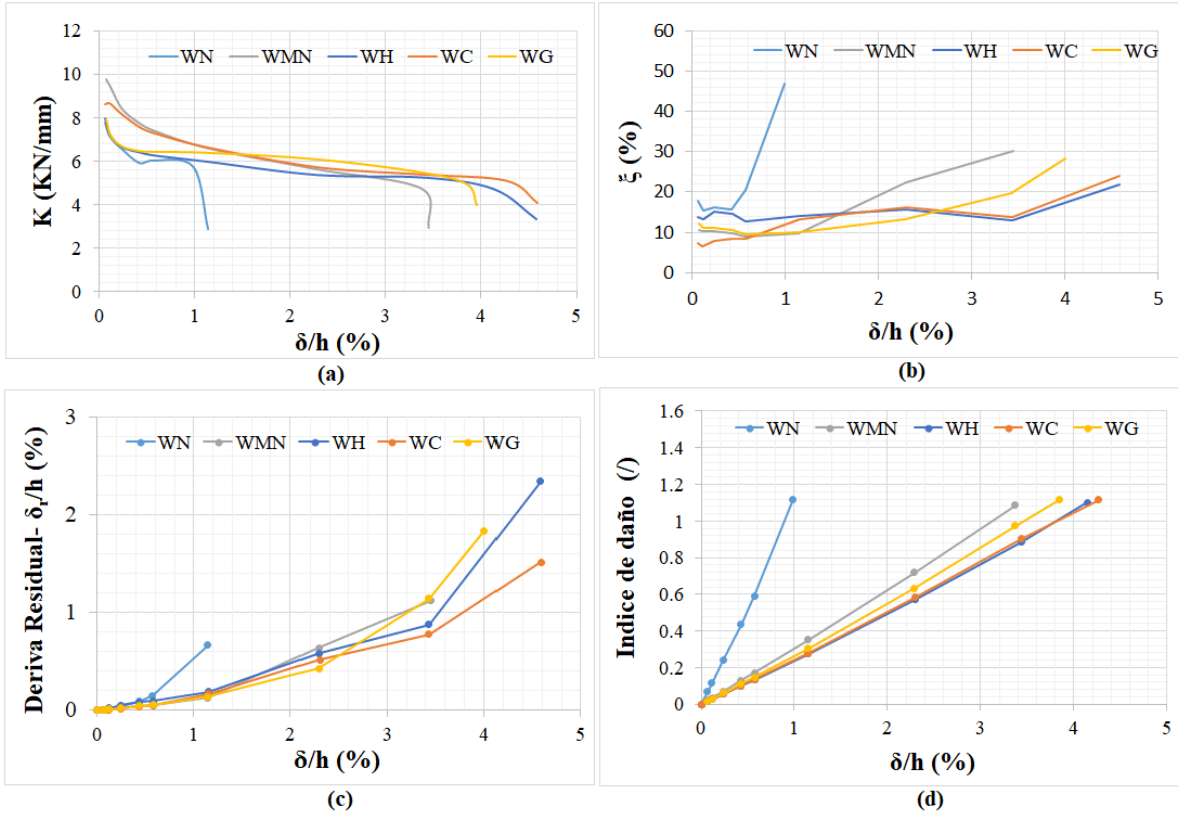


Figura 5.12. Propiedades de muros a carga cíclica: (a) Degradación de rigidez, (b) Factor de amortiguamiento, (c) Deriva residual, (d) Índice de daño

5.5.2.4. Degradación de rigidez

La Figura 5.12.a muestra la degradación de rigidez en los muros a medida que aumentan los ciclos de desplazamiento. Esta fue determinada a partir de la relación entre la media de la sumatoria en valores absolutos de las cargas máximas por ciclos y la media de la sumatoria en valor absoluto del desplazamiento en estos puntos.

$$K_i = \frac{|F_i^- + F_i^+|}{|\delta_i^- + \delta_i^+|} \quad (5.3)$$

En la Figura 5.12.a se puede ver como en el caso de los muros sin reforzar se produce una caída brusca de la rigidez durante los primeros ciclos de carga. En cambio, en los muros reforzados se presenta una pequeña caída de rigidez al principio, y luego comienza una lenta degradación hasta llegar al punto de rotura. Este diagrama presenta una pérdida más brusca de rigidez en los casos de los muros sin reforzar, reforzados solo con mortero y reforzados con FRCM de vidrio, lo cual indica una rotura más frágil que en el caso de los muros

reforzados con fibras vegetales (lo cual coincide con los tipos de fallos presentados anteriormente).

5.5.2.5. Factor de amortiguamiento

Con el fin de evaluar la capacidad de disipación de energía de los muros, se determinó el coeficiente de amortiguamiento viscoso en cada ciclo de carga (ξ_i), este se define como la capacidad de una estructura de disipar la energía aplicada (E_{pi}). La energía fue determinada a partir del promedio de las áreas triangulares definidas en la Figura 5.9 como E_{pi} .

$$E_{pi} = \frac{|AreaABC_i + AreaADE_i|}{2} \quad (5.4)$$

Una vez calculada la energía aplicada fue posible determinar el coeficiente de amortiguamiento para cada ciclo a través de la siguiente ecuación:

$$\xi_i = \frac{1}{2\pi} \frac{E_{di}}{E_{pi}} \quad (5.5)$$

La Figura 5.12.b, muestra la evolución de este factor de amortiguación durante el período de carga. En esta figura se muestra una amortiguación casi constante aparentemente hasta el punto de fisuración, lo cual corresponde al comportamiento presentado en otros estudios [6][76], donde se muestra una amortiguación casi constante. Sin embargo, una vez se alcanza la fisuración, este factor aumenta drásticamente en todos los especímenes, lo cual según otros autores puede deberse a la fricción entre las juntas [6].

La Figura 5.12.b muestra una mejor amortiguación en el caso de los muros reforzados con fibras vegetales, en comparación con la amortiguación experimentada por los otros muros, pues presentó una amortiguación más constante y pronunciada que los otros especímenes.

5.5.2.6. Deformación residual

La deformación residual lateral se define como el desplazamiento lateral permanente cuando se elimina la acción de carga externa. La deformación residual lateral representa la capacidad de auto resiliencia de las estructuras sometidas a cargas cíclicas, y afecta significativamente la reparación y el fortalecimiento subsiguientes de las estructuras. En este estudio, la relación de deriva residual se definió como una relación de deriva cuando la fuerza lateral es igual a cero en cierto ciclo de histéresis. Se tomaron como los valores medios obtenidos en las dos direcciones.

Como se muestra en la Figura 5.12.c, las relaciones de deriva residual de todos los muros aumentan establemente con relación a la deriva de desplazamiento impuestos. Sin embargo, una vez se alcanza la deriva de desplazamiento de 2.3 % los muros reforzados solo con mortero y con FRCM de vidrio, empiezan a sufrir mayores deformaciones permanentes que los muros reforzados con fibras vegetales. Estos indican una mejor capacidad de recuperación de deformaciones por partes de los muros reforzados con fibras vegetales, sobre todo en los reforzados con FRCM de algodón que se presenta con menos deformaciones residuales que los demás muros. Estos resultados muestran que la capacidad de deformaciones reversibles de los muros reforzados con FRCM de algodón puede estar relacionada con la elevada capacidad de deformación y el bajo coeficiente de rigidez de la malla de algodón (ver Figura 5.13) en comparación con las mallas de cáñamo y fibra de vidrio.

5.5.2.7. Índice de daño

El índice de daño propuesto por Kwok y Ang [77] es la relación de la respuesta de muros de mampostería con el nivel esperado de daño. De acuerdo con el comportamiento de la mampostería, Kwok y Ang establecen que el daño por sismo se puede expresar en función de la energía disipada (D_e) y el daño causado por una excesiva deformación (D_u) y lo expresan en términos de un índice de daño (D), definido por las siguientes ecuaciones:

$$D = D_u + D_e \quad (5.6)$$

$$D_u = \frac{\delta_i}{\delta_{max}} \quad (5.7)$$

$$D_e = 0.076 \frac{\int dE_{di}}{V_{max}\delta_{max}} \quad (5.8)$$

Donde δ_i es el desplazamiento a la carga máxima del i -nésimo ciclo, δ_{max} es el desplazamiento a la rotura (que en este caso es el desplazamiento de carga máxima), $\int dE_{di}$ es la energía histerética acumulada, V_{max} es la resistencia última a cortante y 0.076 una constante obtenida a partir de regresión de datos experimentales. El índice de daño calculado para cada espécimen ensayado es una medida de su capacidad para resistir daño, cuando se les sujeta a cargas cíclicas reversibles [77].

La Figura 5.12.d muestra la evolución de índice de daño durante el periodo de carga, donde se confirma la mayor capacidad de los muros reforzados con el FRCM de fibras vegetales de disipar energía y soportar mayores niveles de carga. Pues esta muestra altos índice de daños

a menores deformaciones para los muros sin reforzar, los reforzados solo con mortero, y para los muros reforzados con FRCM de fibra de vidrio.

Kwok y Ang propone unos intervalos de valores para el índice de daño, donde indica que los daños son irreparables a partir de un índice de daño de 0.25, y el colapso a partir de un índice de daño de 1. Sin embargo, debido a que no se capturaron evidencias de daños irreparables antes de la rotura de los especímenes, estos intervalos no fueron considerados en este estudio.

5.5.3. Comparación de efectividad de FRCM de fibras vegetales y FRCM de fibra de vidrio

A raíz de los resultados mostrados anteriormente, donde los FRCM de fibras vegetales presentan mejor comportamiento que los FRCM de fibra de vidrio, se considera necesario la evaluación de la efectividad de cada malla con relación a las propiedades mecánica de la malla, al peso específico de FRCM utilizado, y al coste de cada tipo de FRCM.

La Tabla 5.6 muestra las relaciones de los incrementos de resistencia a cortante, capacidad de deformación y disipación de energía aportados por la malla, con las propiedades de esta a tracción. Los incrementos de resistencia a cortante, capacidad de deformación y disipación de energía fueron determinados a partir de la diferencia entre las propiedades promedio desarrollada en los muros reforzados con FRCM y los muros reforzados solo con mortero.

Tabla 5.6. Relación incremento de propiedades mecánica debido a la malla y las propiedades mecánica de la malla

FRCM	Cáñamo	Algodón	Vidrio
Δ Resistencia a cortante (KN)	50.70	56.48	41.86
Δ Capacidad de desplazamiento (mm)	10.57	10.18	7.49
Δ Energía disipada (KN-mm)	8416.23	9797.05	6628.21
Resistencia a tracción de la malla (KN)	42.59	28.42	32.38
Capacidad deformación de la malla (mm)	14.82	89.05	13.91
Δ Resistencia a cortante/ resistencia a tracción de la malla (/)	1.19	1.99	1.29
Δ Capacidad de desplazamiento/ capacidad deformación de la malla (/)	0.71	0.11	0.54
Δ Energía disipada/ capacidad de desarrollo energía de la malla (/)	8.79	2.74	8.34

La resistencia a tracción y la capacidad de deformación de las mallas fueron determinadas a partir del producto de los valores de estas presentado en la Tabla 5.3 por la longitud efectiva de la malla en cada dirección (870 mm en horizontal y 700 mm en vertical), y a partir de estos valores fue determinado la resultante mediante el teorema de Pitágoras, asumiendo el fallo del refuerzo en diagonal. Ya con estos valores fue posible determinar la capacidad de

desarrollo de energía de la malla a través del producto de la resistencia a tracción por la capacidad de deformación.

Los resultados presentados en la Tabla 5.6 son mejor apreciados en la Figura 5.13, donde se presenta un diagrama idealizado del incremento de resistencia a cortante y capacidad de deformación contrastados con las propiedades mecánicas de las mallas (Figura 5.13a), y los ratios de la relación entre estos incrementos y las propiedades mecánicas de las mallas (Figura 5.13b).

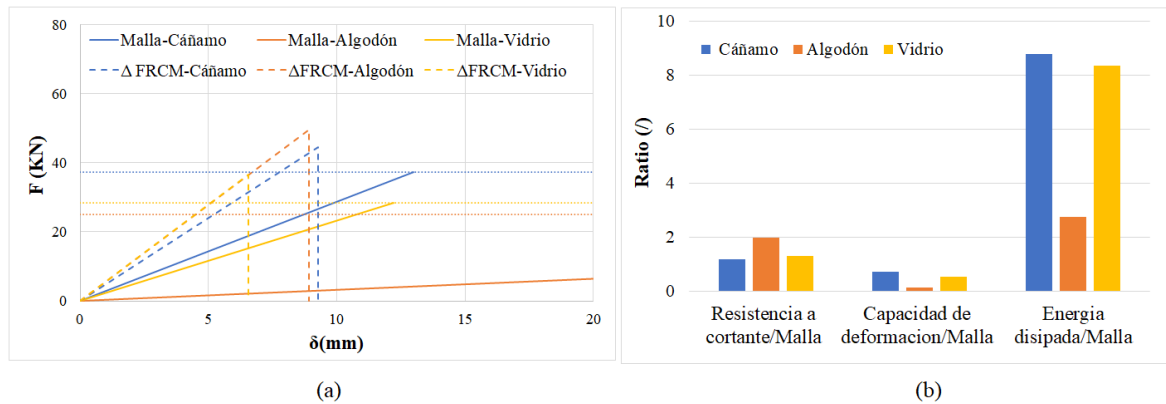


Figura 5.13. Incrementos de propiedades debido a la malla: (a) diagrama idealizado de fuerza-desplazamiento, (b) ratios de incrementos de propiedades.

En la Figura 5.13a. se puede apreciar elevados aportes de resistencia a cortante por parte de todas las mallas utilizadas, superando incluso la resistencia a tracción de las mallas.

En el caso del FRCM de algodón se aprecia un incremento de resistencia a cortante mayor que los demás FRCM, a pesar de ser la malla menos resistente y de no haber alcanzado su máxima deformación (ver Figura 5.13a). Esto confirma la capacidad del FRCM de algodón de aumentar la resistencia a cortante de los muros por su mayor capacidad de deformación y de disipar energía. A pesar de ello el FRCM de algodón presenta menos deformación que los FRCM de cáñamo, lo cual puede deberse al fallo prematuro por desprendimiento del FRCM, el cual a su vez se asume que se produjo por el mayor volumen de malla de refuerzo utilizado en el caso de FRCM de algodón (ver apartado 5.5.1).

En el caso de la Figura 5.13b se muestra ratios de efectividad de las mallas mayores en los casos de los FRCM de cáñamo y vidrio para el incremento de capacidad de deformación y energía disipada. Esto debido a la elevada capacidad de deformación de la malla de algodón en comparación con las demás fibras, y al fallo por desprendimiento presentado en los muros reforzados con FRCM de algodón. Esto deja la duda del alcance de deformación y resistencia

que podrían haber desarrollado los muros reforzados con FRCM de algodón con una conexión más eficiente entre FRCM y mampostería. La Tabla 5.6 y Figura 5.13 muestran que los aportes de resistencia a cortante y capacidad de disipación de energía de los FRCMs a los muros de mampostería, dependen más de la capacidad de deformación y de disipar energía de la malla que de su resistencia a tracción.

En la Tabla 5.7 se muestran volúmenes y pesos de malla y fibra, calculados a partir de las dimensiones geométricas y densidades mencionadas anteriormente de los hilos utilizados en la fabricación de las mallas, así como también a través del peso de las mallas en una báscula de precisión antes de la aplicación del refuerzo.

Tabla 5.7. Relación incremento de cortante máximo y energía disipada con peso específico de FRCM

FRCM	Cáñamo	Algodón	Vidrio
Volumen de malla/ volumen de FRCM (%)	1.26	5.67	0.77
Volumen de mortero/ volumen de FRCM (%)	98.74	94.33	99.23
Peso de malla/volumen de FRCM (g/cm ³)	0.005	0.007	0.002
Peso de mortero/ volumen de FRCM (g/cm ³)	0.207	0.198	0.208
Peso de FRCM/ volumen de FRCM (g/cm ³)	0.2124	0.2055	0.2104
Δ Resistencia a cortante/ peso de FRCM (KN/ g/cm ³)	546.33	592.63	509.53
Δ Energía disipada/ peso de FRCM (KN-mm/ g/cm ³)	39628.27	47664.28	34359.45

Uno de los primeros datos a destacar en la Tabla 5.7 es la reducción de la cantidad de mortero debido al uso de un mayor volumen de fibras en los casos de los FRCM de cáñamo (0.5 %) y algodón (5 %), lo que lleva a aumentar el peso de la malla de refuerzo y a reducir el peso de mortero a utilizar. A raíz de esto se observa que el peso total del FRCM de algodón termina siendo menor que los FRCM de vidrio (0.2104 g/cm³) y cáñamo (0.2124 g/cm³). Esto al final lleva a unos ratios de resistencia a cortante y energía disipada sobre peso del FRCM, superiores para el caso del FRCM de algodón y de cáñamo, en comparación con el FRCM de vidrio.

Por otro lado, un factor importante a considerar es el coste de las mallas de fibras vegetales en comparación con las de fibras de vidrio, pues a pesar del bajo coste que suponen las fibras vegetales, el mayor volumen de fibras vegetales, y la resina epoxi utilizada para el revestimiento de la malla puede suponer un aumento significativo del coste de este tipo de malla. Por lo que en la Tabla 5.8 se analiza el coste de los FRCM con las diferentes mallas utilizadas y la efectividad de las mallas de fibras vegetales en cuanto al coste de estos compuestos de FRCM.

Tabla 5.8. Relación incremento de cortante máximo y energía disipada con coste de FRCM

FRCM	Cáñamo	Algodón	Vidrio
Coste de hilos/área de malla (€/m ²)	5.79	8.93	-
Coste de resina/ área de malla (€/m ²)	4.41	12.88	-
Coste de malla/área de malla (€/m ²)	10.20	21.82	24.00
Coste de mortero/área de malla (€/m ²)	26.98	25.78	27.12
Coste de FRCM/ área de malla (€/m ²)	32.50	43.12	46.41
Δ Resistencia a cortante/ coste de FRCM (KN/ €/m ²)	3.57	2.82	2.31
Δ Energía disipada/ coste de FRCM (KN-mm/ €/m ²)	258.93	227.20	155.74

Para el análisis de coste de las mallas de fibras vegetales no se tomó en cuenta el coste de elaboración de la malla, porque no se conoce el coste que podría suponer su elaboración a nivel industrial. Por tanto, el análisis de costo se realizó con los precios de los materiales utilizados para su elaboración (hilos y resina) suministrados por los fabricantes. Estos precios son solo aproximaciones, pues se considera que serían más bajos para la producción de este tipo de mallas a nivel industrial.

En la Tabla 5.8 se observa que las mallas de algodón consumen mayor cantidad de resina que las mallas de cáñamo, lo cual induce a aumentar su precio significativamente. Esto se debe al mayor volumen de fibras utilizado en estas mallas, y a la elevada capacidad de absorción (de acuerdo a bibliografía [20]) de estas fibras en comparación con las fibras cáñamo.

Luego de sumar los precios de hilo y resina se obtiene que la malla de menor costo es la de cáñamo, seguida por la de algodón, y la de vidrio (precio suministrado por el fabricante) resulta siendo la de mayor precio. Cuando observamos la diferencia de coste entre los FRCM de fibras de vidrio y los de fibras vegetales se observa de aproximadamente 14 euros en el caso de cáñamo y 3 euros en el caso del algodón.

En cuanto a las ratios de Resistencia a cortante y energía disipada relacionado con el costo se observa que, al contrario de la tabla anterior, estos ratios se muestran mayores en los FRCM de cáñamo que en los FRCM de algodón y de fibra de vidrio, debido a los bajos costes presentados por las mallas de cáñamo, y el menor uso de resina.

La comparación hecha en este apartado confirma la mayor efectividad de la malla de fibras vegetales desarrolladas en esta tesis en comparación con las mallas de fibras de vidrio, sin embargo, se considera que la efectividad de este tipo de malla se puede seguir mejorando, mediante modificaciones a su geometría y a los volúmenes de fibras utilizados (pues el fallo por desprendimiento del FRCM puede estar asociado al exceso de refuerzo), así como

también mediante uso de resinas de menor precio, que le permita una mayor flexibilidad a las mallas, y que sean más sostenibles con el medio ambiente.

5.6. Conclusiones

A partir de los ensayos realizados en este capítulo y el análisis de los resultados obtenidos se llega a las siguientes conclusiones:

- Los tipos de fallos presentados en los diferentes especímenes, indican una mayor distribución de las tensiones en los refuerzos en el caso de los muros reforzados con FRCM de fibras vegetales, y con ello la posibilidad de disipar mayor energía a través de un padrón de multifisuras. Sin embargo, los desprendimientos del refuerzo, pueden indicar un exceso en el volumen de fibra utilizado, y la necesidad de recurrir a método de anclaje, para mejorar la conexión entre FRCM y mampostería.
- Los resultados muestran un mayor incremento de la resistencia a cortante y de la capacidad de disipación de energía en los muros reforzados con fibras vegetales con respecto a los otros muros reforzados, pues la capacidad de alargamiento de las mallas de fibras vegetales (sobre todo la de algodón), les permitió alcanzar mayores niveles de carga y deformación.
- El Refuerzo con FRCM de fibras vegetales logró aumentar la capacidad de distorsión de los muros en más de un 300%, lo cual les permitió disipar más energía que los demás muros.
- Las propiedades de degradación de rigidez, amortiguamiento, deformación residual, e índice de daño, fueron desarrolladas con mayor eficiencia en los muros reforzados con FRCM de fibras vegetales en comparación con otros especímenes.
- El mayor volumen de fibras utilizado en los casos de los FRCM de fibras vegetales permitió reducir la cantidad de mortero en cerca 0.5% a los FRCM de cáñamo y en cerca de 5% al de algodón, en comparación con los FRCM de fibra vidrio. Esto lleva a reducir el peso específico del FRCM y los efectos medioambientales causado por el uso de la matriz cementicia utilizada en este estudio.
- La comparación entre los refuerzos de FRCM de fibras vegetales con los de vidrio indican una mayor efectividad de la malla de fibras vegetales desarrolladas en este proyecto en cuanto a eficiencia de las malla (sobre todo en el caso del cáñamo), coste y peso específico de FRCM, sin embargo, se considera que la efectividad de este tipo de malla puede ser mejorada, mediante modificaciones a su geometría y a los volúmenes de fibras utilizados (debido los fallos por desprendimiento del FRCM ocurridos), así como también mediante uso de resinas de menor precio, más flexibles, y que sean más sostenibles con el medio ambiente.

Capítulo VI. Estudio analítico de FRCM a tracción y muros de mampostería reforzados con FRCM sometidos a carga cíclica

6.1. Introducción

Con el objetivo de comparar los resultados experimentales con algún modelo analítico y a través de ello proponer nuevas formulaciones, se realizó un estudio analítico de los especímenes de FRCM sometidos a tracción (capítulo 4) y los muros de mampostería reforzados con FRCM sometidos a cargas cíclicas (capítulo 5).

6.2. Estudio analítico del FRCM a tracción

Uno de los modelos analíticos más utilizados para analizar el comportamiento del FRCM a tracción es propuesto por Aveston-Cooper-Kelly (ACK) [65][66]. La teoría ACK consiste en una definición trilineal, que superpone la curva experimental tensión-deformación de los sistemas FRCM. Estas tres líneas representan tres etapas de comportamiento diferentes (ver Figura 6.1) que se pueden identificar como:

Etapa I: primera etapa elástica lineal sin fisuras, donde el mortero y la malla se deforman juntos.

Etapa II: etapa de formación de fisuras, que se caracteriza por la formación de múltiples fisuras del mortero inducido por la interacción con la malla a lo largo del espécimen.

Etapa III: estabilización de la fisuración y apertura de fisuras, donde todas las tensiones son soportadas por la malla.

Las suposiciones empleadas en el desarrollo de la teoría de ACK son:

- ✓ Las fibras solo son capaces de transportar carga a lo largo de su eje longitudinal
- ✓ El enlace matriz-fibra es débil.
- ✓ Una vez que la matriz y la fibra se despegan, una tensión de cizallamiento por fricción pura gobierna el comportamiento de la interfaz matriz-fibra.
- ✓ El esfuerzo cortante de la interfaz friccional es constante a lo largo de la interfaz no adherida.
- ✓ Se desprecian los efectos de Poisson de la fibra y la matriz.
- ✓ Se supone un reparto de carga global para las fibras.
- ✓ Las tensiones normales de la matriz, transversales a la dirección de carga, son uniformes en la sección transversal.

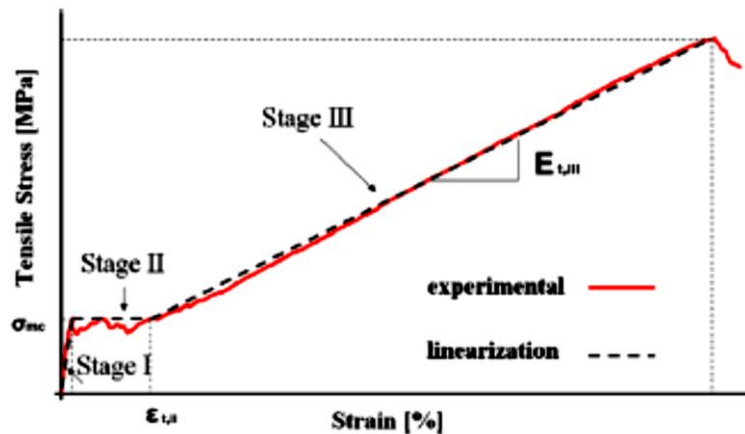


Figura 6.1. Curva típica experimental de esfuerzo-deformación del FRCM a tracción y modelo ACK [66].

Según la teoría de ACK, en la primera etapa, FRCM obedece la ley de mezclas:

$$E_I = E_f v_f + v_m E_{m0} \quad (6.9)$$

Donde E_I es el módulo de elasticidad de FRCM en la etapa I, E_f representa el módulo de elasticidad de las fibras, E_{m0} es el módulo de elasticidad de la matriz, v_f y v_m son la fracción volumétrica de fibras y matriz, respectivamente. En esta primera etapa, el comportamiento a cortante de la interfaz matriz-fibra se supone elástico. La etapa I finaliza cuando el compuesto alcanza la tensión de fisuración múltiple (σ_{mc}), que es igual a la primera tensión de fisuración (ver Figura 6.1). Esto se calcula con la siguiente formulación:

$$\sigma_{mc} = \frac{E_I \sigma_{mu}}{E_m} \quad (6.2)$$

Donde σ_{mu} es la resistencia a la tracción del mortero. La deformación en este punto se calcula mediante:

$$\varepsilon_I = \frac{\sigma_{mc}}{E_I} \quad (6.3)$$

En este valor, el compuesto presenta múltiples fisuras, estas fisuras sucesivas se forman a medida que aumenta la deformación. En esta etapa, se supone que la tensión de fisuración múltiple es constante hasta que alcanza la deformación al final de la etapa II (ε_{II}), que se puede definir como:

$$\varepsilon_{II} = (1 + 0.666\alpha_e) \frac{\sigma_{mu}}{E_{mo}} \quad (6.10)$$

Donde:

$$\alpha_e = \frac{E_{mo} \nu_m}{E_f \nu_f} \quad (6.11)$$

En la tercera etapa, solo las fibras contribuyen a soportar las tensiones asociadas a la deformación aplicada. Por lo tanto, la tensión de la matriz permanece constante a pesar del aumento de la carga de tracción. La rigidez del FRCM en esta etapa se define por la expresión:

$$E_{III} = E_f \nu_f \quad (6.12)$$

6.2.1 Resultados, análisis y ajuste del estudio analítico del FRCM a tracción

El modelo ACK no es aplicable al FRCM con mallas cubiertas con poliéster, debido a que no hubo buena interacción malla-matriz después de la fisuración del mortero (capítulo 4). Además, de que el bajo porcentaje de aprovechamiento de las mallas cubiertas con poliéster puede indicar un deslizamiento parcial dentro de FRCM. Por lo tanto, las muestras de FRCM con mallas cubiertas con epoxi fueron las candidatas más adecuadas para ser representadas por el modelo ACK.

La Tabla 6.1 resume los resultados analíticos calculados con el modelo ACK y los resultados obtenidos con dos variaciones del modelo ACK, que se presentan en este

documento para mejorar su aplicabilidad en FRCM de fibras vegetales. En esta tabla se presenta, la fracción volumétrica de fibras (v_f), la fracción volumétrica de mortero (v_m), la tensión de fisuración del mortero (σ_{mc}), la tensión máxima del FRCM ($\sigma_{c,u}$) el cual es igual a tensión de rotura de la malla, y el módulo de elasticidad en la etapa I (E_I) y etapa III (E_{III}) del modelo trilineal presentado por ACK. Estos parámetros se calcularon con las ecuaciones (6.9)-(6.12).

Tabla 6.1. Resultados del análisis analítico de especímenes de FRCM

Mallas	Modelo ACK				Modelo Ajustado 1				Modelo Ajustado 2	
	Cáñamo	Lino	Sisal	Algodón	Cáñamo	Lino	Sisal	Algodón	Sisal	Algodón
v_f	0.014	0.014	0.078	0.067	0.014	0.014	0.078	0.067	0.078	0.067
v_m	0.986	0.986	0.922	0.933	0.986	0.986	0.922	0.933	0.922	0.933
σ_{mc} (MPa)	4.82	4.80	4.45	4.33	4.82	4.80	4.45	4.33	3.33	3.25
σ_u (MPa)	520.76	630.83	111.45	91.95	520.76	630.83	111.45	91.95	111.45	91.95
ϵ_{II} (%)	0.63	0.67	0.79	4.68	0.80	1.16	1.59	4.65	1.08	1.12
E_I (GPa)	9.32	9.29	8.60	8.60	9.32	9.29	8.60	8.39	8.60	8.39
E_{III} (GPa)	0.53	0.49	0.38	0.06	0.39	0.68	0.61	0.02	0.44	0.03

Las diferencias notables entre los resultados experimentales y las estimadas realizadas con el modelo ACK (ver Figura 6.3) sugirieron modificarlo. Esto se observa principalmente en las etapas II y III, donde el modelo ACK predice una respuesta más rígida que la observada experimentalmente.

En la etapa II, el modelo de ACK se modificó de acuerdo con la propuesta realizada por [78], que a su vez se basó en la ecuación del Eurocódigo 2 [79] para estimar el ancho de fisura (w_k) del hormigón armado sometido a fuerzas de tracción:

$$w_k = s_{r,max}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (6.13)$$

donde $s_{r,max}$ es el ancho máximo de fisuras, ϵ_{sm} es la deformación media en el refuerzo y ϵ_{cm} es la deformación media del hormigón entre las fisuras.

Se puede considerar que la suma total de anchuras de fisuras es igual a la diferencia entre el alargamiento del refuerzo y el alargamiento del hormigón:

$$\sum w = \Delta l - \Delta l_c = (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \cdot l \quad (6.14)$$

$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ puede calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \quad (6.15)$$

Donde σ_s es la tensión del refuerzo en una sección fisurada, k_t es un factor dependiente de la duración de la carga, $f_{ct,eff}$ es el valor medio de la resistencia a la tracción del hormigón en el momento en que se forma la primera fisura, $\rho_{p,eff}$ es la relación de refuerzo, A_s/A_c , y α_e la relación E_s/E_c .

La ecuación (6.15) se puede usar para calcular la deformación al final de la etapa II. Al adaptar la notación al sistema de FRCM, se obtiene la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{II} = \frac{\sigma_{h,u} - k_t \frac{\sigma_{cm}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_{e2} \cdot \rho_{p,eff})}{E_f} + \varepsilon_I \quad (6.160)$$

Donde $\sigma_{h,u}$ es la resistencia a la tracción de la malla, σ_{cm} es el valor medio del esfuerzo de tracción del mortero en el momento en que se forma la primera fisura, $\rho_{p,eff}$ es la relación de refuerzo, A_f/A_m , y α_{e2} es la relación E_f/E_m .

En el Eurocódigo 2, el factor de duración de la carga (k_t) es igual a 0.6 para la carga a corto plazo y 0.4 para la carga a largo plazo. Para representar la campaña experimental, se decide utilizar el valor correspondiente a las cargas a corto plazo.

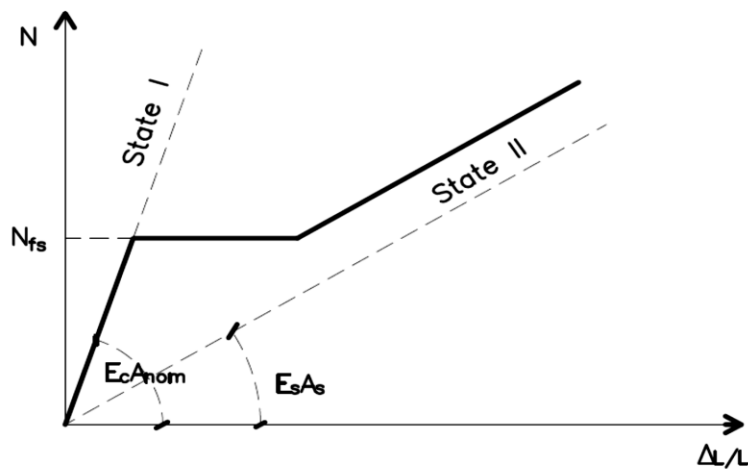


Figura 6.2. Comportamiento teórico del hormigón a tracción

La etapa III del modelo de ACK también se modificó. El cambio se basó en la formulación presentada por Jiménez Montoya [80], que representa el hormigón armado utilizando una ley poligonal ($N - \Delta L/L$), donde se supone que la deformación del acero crece paralelamente a la línea recta del Estado II (ver Figura 6.2).

En el modelo modificado (Modelo ajustado 1), la deformación al final de la etapa III se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{III} = \frac{\sigma_{h,u}}{E_f v_f} \quad (6.171)$$

Y el módulo de Young en la etapa III es:

$$E_{III} = \frac{(\sigma_{h,u} - \sigma_{mc})}{(\varepsilon_{III} - \varepsilon_{II})} \quad (6.18)$$

Además, se observó que el FRCM de sisal y algodón mostraron una tensión de fisuración experimental menor que la tensión de fisuración analítica predicha por el modelo ACK o el modelo ajustado 1 (ver Figura 6.3). Este hecho puede atribuirse al módulo de elasticidad mucho más bajo del sisal y los hilos de algodón recubiertos (0.93 y 4.87 GPa, respectivamente) en comparación con el módulo de elasticidad más alto de la matriz de mortero (8.92 GPa). Por lo tanto, fue necesario ajustar las ecuaciones para este tipo de combinación de rigidez: malla de fibra con menor módulo de elasticidad que la matriz de mortero.

La segunda modificación (modelo ajustado 2) se realizó para reducir el valor de esfuerzo de fisuración del FRCM (σ_{mc}). La ecuación (6.2) se multiplica por un coeficiente experimental (β) de 0.75 para los casos en que el módulo de elasticidad de las fibras es menor que el módulo de elasticidad del mortero.

$$\sigma_{mc} = \frac{\beta \cdot E_f \sigma_{mu}}{E_{mo}} \quad (6.19)$$

Además, no se consideró que el factor de duración de la carga (k_t) en el cálculo de la deformación al final de la etapa II (ε_{II}). Esta modificación tuvo como objetivo reducir ε_{II} para mejorar el ajuste analítico de los casos en los que el módulo de Young de las fibras es menor que el módulo de Young del mortero.

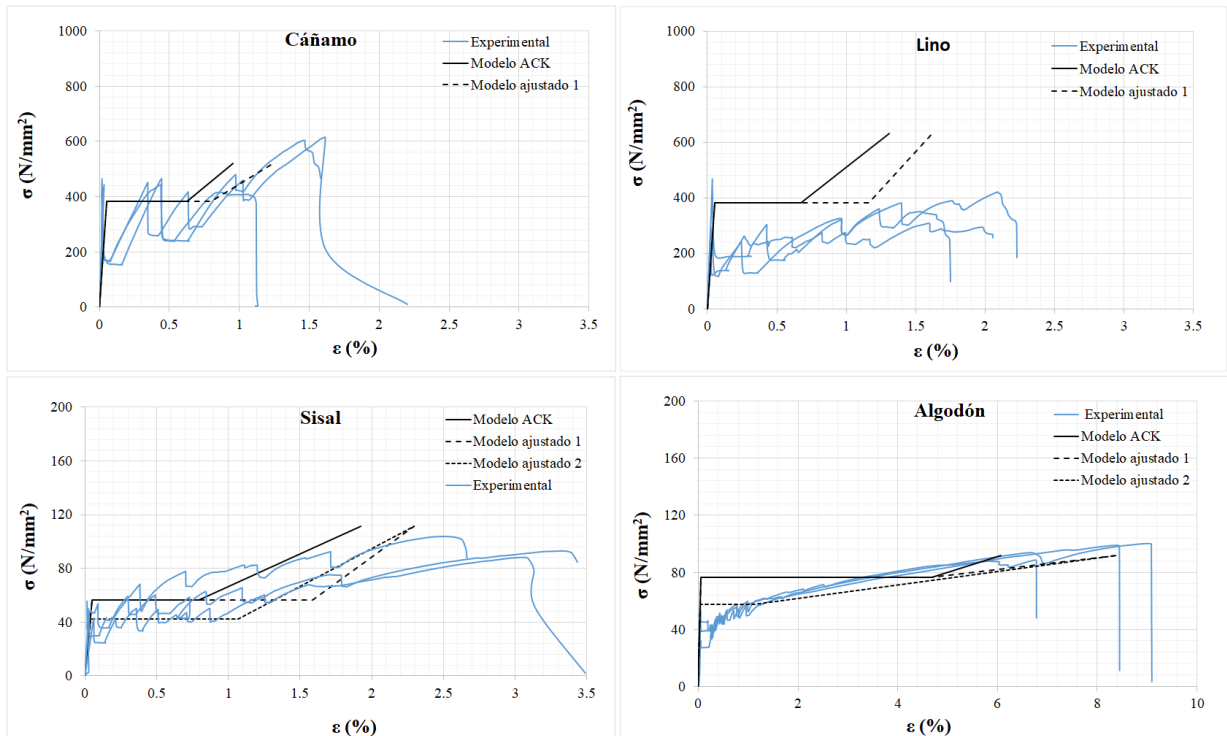


Figura 6.3. Comparación de los resultados experimentales y analíticos del FRCM

Los resultados experimentales, los resultados del modelo de ACK y los resultados de los dos modelos ajustados se muestran juntos en los diagramas de esfuerzo-deformación de la Figura 6.3 con fines de comparación y análisis.

La Figura 6.3 muestra que el modelo ACK no es eficiente para predecir la respuesta a tracción de los FRCM de fibras vegetales estudiados en esta tesis. Además, ni el modelo ACK ni el modelo ajustado 1 se ajustan a los resultados experimentales obtenidos para especímenes de FRCM de lino, debido a que estos fallaron principalmente por desprendimiento de mortero.

Sin embargo, ACK fue adecuado para modelar la respuesta estructural de la primera etapa (etapa I) en los casos en que el módulo de elasticidad de la malla era más alto que el módulo de matriz: FRCM de cáñamo y lino. Por el contrario, el modelo ajustado 2 predice el esfuerzo de fisuración con mayor precisión que el modelo ACK para los casos en que el módulo de elasticidad de la malla fue menor que el módulo de la matriz: sisal y algodón.

En todos los casos de la Figura 6.3 se muestra un aumento progresivo de la tensión a lo largo de la formación de fisuras múltiples (etapa II), que no se ajusta al nivel de tensión constante propuesto por los modelos para esta etapa. Además, el rango de deformación en el

que se desarrolla la etapa II es más largo que el predicho por cualquier modelo. Estas dos diferencias particulares pueden deberse al comportamiento no lineal del mortero según lo sugieren otros autores [80].

Además, la degradación de la rigidez experimental en la etapa III es mayor que cualquier predicción del modelo. Esto puede deberse a la estructura discontinua de los hilos de fibra vegetal y la degradación progresiva de las fibras causada por la interacción local malla-mortero.

Según la Figura 6.3, las modificaciones propuestas al modelo ACK aumentan la precisión para estimar la deformación al final de la etapa II y III.

Después de analizar los resultados, se resalta que es necesaria una interacción malla-matriz correcta para lograr el comportamiento de fisuración múltiple esperado por el FRCM y que se usa como hipótesis inicial para los modelos analíticos.

6.3. Estudio analítico de muros reforzados con FRCM de fibras vegetales

6.3.1 Resistencia a cortante

Para el estudio analítico de los muros reforzados con FRCM se tomó como referencia el método descrito por la ACI 549.4R-13 [40], donde se determina la resistencia nominal a cortante en el plano de muros reforzados con FRCM a partir de la siguiente formula:

$$V_n = V_w + V_f \quad (6.20)$$

Donde V_n es la resistencia a corte nominal, V_w es la resistencia cortante de muros sin reforzar y V_f es el aporte de resistencia a cortante por parte del FRCM al muro.

6.3.1.1. Resistencia a cortante del muro sin reforzar

Para determinar la resistencia a cortante de los muros sin reforzar utilizados en este estudio, se tomó como referencia los procedimientos descrito en [37] y [36]. Estos identifican 4 tipos de fallos por cortante en muros de mampostería, los cuales fueron validados por los resultados experimentales.

Estos fallos por cortantes son definidos como fallo por deslizamiento de corte, fricción de corte, tensión diagonal y aplastamiento en la punta de aplicación de carga (en el caso de muros sometido a ensayo compresión diagonal).

El fallo por deslizamiento se produce debido a una falla de unión entre la unidad de mampostería y el mortero, lo que resulta en fisuras horizontales a lo largo de la unión de la mampostería. Los fallos por fricción de corte se producen debido al fallo de la unión seguida por la propagación de la fisura a través de las juntas horizontales y verticales. El fallo por tensión diagonal es producido por tensión principal inducida por altas tensiones de compresión y corte que exceden la resistencia a la tracción de la mampostería. El aplastamiento de la punta ocurre cuando las tensiones generadas en los extremos de carga exceden la resistencia a la compresión de la mampostería, este último se presenta en los muros ensayados de compresión diagonal, por lo que en este estudio no se consideró este tipo de fallo.

Atendiendo a estos tipos de fallos Silva et al [37] proponen ecuaciones para determinar la resistencia a cortante considerando estos tipos de fallo, tomando como criterio de diseño el uso del valor mínimo resultante de estas 4 ecuaciones. Teniendo en cuenta que este estudio analítico es realizado para fines de comparación con los resultados experimentales realizados en este estudio, se adoptará como resistencia a cortante del muro el valor que más se ajuste a los resultados experimentales, y más se identifique con el tipo de fallo ocurrido en los ensayos experimentales. A continuación, se presentan las ecuaciones para cada tipo de fallo:

1. Fallo por deslizamiento:

$$V_{ss} = \frac{\tau_0}{1 - \mu_0 \tan \theta} An \quad (6.21)$$

2. Fallo por fricción de corte:

$$V_{sf} = \frac{\tau_{0,m}}{1 - \mu_{0,m} \tan \theta} An \quad (6.16)$$

$$\tau_{0,m} = \frac{\tau_0}{1 + 1.5\mu_0 \left(\frac{h}{w}\right)} \quad (6.22)$$

$$\mu_{0,m} = \frac{\mu_0}{1 + 1.5\mu_0\left(\frac{h}{w}\right)} \quad (6.23)$$

3. Fallo por tensión diagonal:

$$V_{dt} = \frac{\tan\theta + \sqrt{21.16 + \tan^2\theta}}{10.58} f'_{t,w} A_n \quad (6.24)$$

Donde el que más se ajuste a los resultados experimentales de V_{ss} , V_{sf} y V_{dt} , será igual a la resistencia a cortante del muro sin reforzar (V_w), τ_0 es la resistencia de adherencia entre junta de mortero y ladrillo, μ_0 es el coeficiente de fricción a cortante, y θ es el ángulo entre la diagonal de los muros y la longitud horizontal paralela al punto de aplicación de la carga cíclica, A_n es el área de corte paralela a la dirección de las tensiones de corte, h y w son el espesor y la longitud de la unidad de mampostería respectivamente, y $f'_{t,w}$ es la resistencia a tracción de la mampostería calculado a partir de $0.5\sqrt{f'_w}$, siendo f'_w la resistencia a compresión de la mampostería.

6.3.1.2. Contribución del FRCM a la resistencia a cortante del muro (Vf)

Para la determinación del aporte de resistencia a cortante por parte del FRCM a los muros de mampostería sometidos a cortante en el plano el ACI 549.4R-13 propone lo siguiente.

La deformación a tensión del FRCM a cortante debe ser menor o igual a 0.004, y la tensión de diseño a cortante (f_{fv}) para el FRCM es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$f_{fv} = E_f \varepsilon_{fv} \quad (6.25)$$

Donde E_f es el módulo de elasticidad de las fibras.

A partir de la ecuación anterior es posible determinar el aporte de resistencia a cortante por parte del FRCM mediante la siguiente ecuación:

$$V_f = 2nA_f L f_{fv} \quad (6.26)$$

Si A_f el área de fibra por unidad de longitud, L la longitud del muro paralela a la dirección de la fuerza de cortante aplicada, y n es el número de mallas utilizadas.

6.3.2. Distorsión de fallo

6.3.2.1. Distorsión de fallo de muros sin reforzar

Para el cálculo de los desplazamientos últimos y de rotura se utilizó el procedimiento descrito en por Kwok y Ang [77], donde define el desplazamiento de fallo (δ_f) como un múltiplo del desplazamiento correspondiente al cortante máximo (δ_{max}).

$$\delta_f = \alpha \delta_{max} \quad (6.27)$$

En el que α es una constante experimental dependiente de la deformación unitaria, y el desplazamiento equivalente a la carga máxima se puede obtener a partir:

$$\delta_{max} = \lambda_c \frac{V_{max}}{K_e} \quad (6.28)$$

Donde K_e es la rigidez inicial del muro el cual se obtiene a partir del módulo de elasticidad (E_w) y de cortante (G_w) del muro, donde:

$$G_w = \frac{E_w}{2(1 - \nu)} \quad (6.29)$$

ν es coeficiente de poisson asumido como 0.2, y λ_c es un factor obtenido a partir de un análisis de regresión realizado por Kwok y Ang [77], del cual resulta la siguiente ecuación:

$$\lambda_c = \frac{1}{\left(0.052 + 0.82 \frac{\sigma_c}{f'_w}\right)} \quad (6.30)$$

σ_c es el esfuerzo de compresión aplicado, y f'_w es la resistencia a compresión de la mampostería.

Considerando que el fallo total de los especímenes se produjo al alcanzar el cortante máximo (ver capítulo 5), para este estudio se asume que $\delta_f = \delta_{max}$.

6.3.2.2. Distorsión de fallo de muros reforzados con FRCM

Para la determinar el desplazamiento de fallo de los muros reforzados con FRCM se utilizaron las mismas ecuaciones de los muros sin reforzar con la inclusión de la teoría de la mezcla:

$$A_h = A_w v_w + A_{FRCM} v_{FRCM} \quad (6.31)$$

$$E_{wr} = E_w v_w + E_{FRCM} v_{FRCM} \quad (6.32)$$

Donde v_w y v_{FRCM} son los factores volumétricos del muro de mampostería y el FRCM, A_w y A_{FRCM} son el área de cortante del muro y el área de cortante homogeneizada del FRCM, y E_{FRCM} es el módulo de elasticidad del FRCM el cual es igual al módulo de elasticidad de las fibras por su factor volumétrico, pues se asume que es esta la que define el comportamiento elástico del FRCM una vez el matriz alcanza la fisuración.

$$E_{FRCM} = E_f v_f \quad (6.33)$$

6.3.3. Resultados, análisis y ajuste del estudio analítico de muros reforzados con FRCM a cortante

6.3.3.1. Resistencia a cortante

La Tabla 6.2 y Tabla 6.3 resume los resultados analíticos calculados con el modelo de ACI 549.4R-13 y los resultados obtenidos a partir de algunos ajustes hechos a este modelo, para mejorar su aproximación y aplicabilidad en la predicción del aporte del FRCM de fibras vegetales y de vidrio a muros de mampostería sometidos a cortante. En esta tabla se presenta, la fracción volumétrica de fibras (v_f), la fracción volumétrica de mortero (v_m), resistencia a cortante del muro sin reforzar (V_w), la resistencia de adherencia entre junta de ladrillo y mortero (τ_0) determinado en otros estudios realizados en el grupo de investigación LITEM con estos mismos materiales [69] (ver Tabla 5.2), el coeficiente de fricción a cortante (μ_0) también determinado en el estudio mencionado anteriormente, la tangente del ángulo entre la diagonal de los muros y la longitud horizontal ($\tan\theta$), el área de cortante (A_n), los valores de tensión (f_{fv}) y carga de cortante (V_f) aportado por el FRCM, calculados a partir del módulo de elasticidad, la deformación máxima y la resistencia a tracción de las fibra y el mortero obtenidas experimentalmente en los capítulos 3 y 4.

Los resultados presentados en la Tabla 6.2 demuestran que de los esfuerzos a cortante calculados, el que más se aproxima a los resultados experimentales obtenidos en este estudio es el cortante de fallo por deslizamiento. Este también coincide con el fallo identificado en los especímenes de muros sin reforzar ensayados (capitulo 5). En base a esto el cortante por deslizamiento será considerado como la resistencia a cortante del muro sin reforzar (V_w).

Tabla 6.2. Resultados de análisis de resistencia a cortante de muros sin reforzar

	Propiedades	Valor	Δ (%)
Muro sin refuerzo	μ_0 (/)	0.73	-
	$\tan\theta$ (/)	0.78	-
	τ_0 (MPa)	0.17	-
	A_n (mm ²)	115200.00	-
	V_{ss} (KN)	45.58	12.43
	V_{sf} (KN)	30.92	-23.73
	V_{sd} (KN)	125.21	208.85

Los resultados mostrados en la Tabla 6.3 presenta una elevada diferencia entre la resistencia a cortante calculada a partir del modelo ACI 549.4R-13 y los resultados experimentales obtenidos en este estudio, lo cual evidencia la falta de precisión de este modelo para los casos considerados. Debido a esto fue necesario modificar las ecuaciones establecidas y ajustarlas a los resultados experimentales obtenidos en este estudio.

Tabla 6.3. Resultados de análisis de resistencia a cortante de muros reforzados

	Mallas	Modelo ACI 549.4R-13			Modelo Ajustado		
		Cáñamo	Algodón	Vidrio	Cáñamo	Algodón	Vidrio
Muros reforzados con FRCM	v_f (/)	0.01	0.06	0.01	0.01	0.06	0.01
	v_m (/)	0.99	0.94	0.99	0.99	0.94	0.99
	A_f (mm ² /mm)	0.08	0.24	0.04	0.08	0.24	0.04
	A_m (mm ²)	17856.00	17492.10	17352.38	17856.00	17492.10	17352.38
	$A_{h,FRCM}$ (mm ²)	-	-	-	17632.83	16529.10	17223.75
	$E_f v_f$ (Gpa)	-	-	-	0.49	0.05	0.47
	L (mm)		900.00			900.00	
	f_{tv} (Mpa)	154.96	3.72	245.00	6.35	4.12	5.75
	ϕ (/)	-	-	-	1.00	1.48	1.00
	V_f (KN)	22.31	1.58	18.52	111.89	68.07	99.10
	V_n (KN)	67.89	47.16	64.10	157.79	168.30	144.83
	Δ (%)	-56.64	-70.95	-56.61	0.78	3.67	-1.97

A partir de la teoría de la mezcla en los materiales compuesto, y considerando el aporte significativo de resistencia que presentaron los muros reforzados solo con mortero (ver capítulo 5), se calculó el área del compuesto homogeneizada ($A_{h,FRCM}$).

$$A_{h,FRCM} = A_f v_f + A_m v_m \quad (6.34)$$

Donde A_m es el área de mortero, y el módulo de elasticidad del FRCM fue calculado a partir de la ecuación (6.33).

Una vez determinado el módulo de elasticidad del FRCM es posible determinar la tensión de corte aportada por FRCM, utilizando la deformación unitaria última de los hilos, determinada experimentalmente en el capítulo 4, pues los resultados experimentales de FRCM mostraron la misma deformación última de los hilos (ver capítulo 4). Por lo que la tensión de cortante aportada por el FRCM será igual a:

$$f_{tv} = E_{FRCM} \varepsilon_f \quad (6.34)$$

A partir de esto se determina la resistencia a cortante mediante la ecuación:

$$V_f = f_{tv} A_{h,FRCM} \quad (6.35)$$

Con la resistencia a cortante aportado por el muro y por el refuerzo determinado, la resistencia nominal del muro reforzado con FRCM se puede determinar mediante la ecuación (6.20).

A pesar de las modificaciones anteriores en el caso de los muros reforzados con FRCM de algodón siguió presentando resistencia a cortantes muy inferiores a las de los resultados experimentales. Esto se puede explicar debido al bajo módulo de elasticidad y resistencia a tracción que presenta el algodón en comparación con las fibras comúnmente utilizadas en los sistemas de FRCM como la de vidrio. A raíz de esto se determinó un coeficiente φ determinado a partir de la relación entre las propiedades mecánicas la matriz de refuerzo y las de las fibras.

$$\varphi = 1 + \frac{\sigma_{mo} E_{mo}}{\sigma_f E_f} \quad (6.36)$$

Por lo que la resistencia a cortante nominal de los muros fue determinado con la ecuación:

$$V_n = \varphi(V_m + V_f) \quad (6.37)$$

Estas modificaciones fueron útiles para proponer un modelo ajustado para determinar la resistencia a cortante de muros reforzados con FRCM. Los resultados de este modelo se presentan en la Tabla 6.3 donde se puede apreciar mejor aproximación a los resultados experimentales con diferencias respecto a los datos experimentales de 0.78 a 3.67 %. Esta mejor aproximación se puede deber al hecho de que en el modelo ajustado se toma en cuenta el aporte del área homogeneizada de FRCM, y a que la deformación unitaria de la malla no se ve limitada a 0.4 %.

6.3.3.2. Distorsión de fallo

Los resultados del modelo analítico presentado por Kwok y Ang y el modelo ajustado correspondientes son presentados en la

Tabla 6.4. En esta se presentan el módulo de elasticidad (E), el módulo de cortante (G), el área de cortante (A), la resistencia a compresión (f'_c) y el esfuerzo de compresión aplicado (σ_c). Para el caso de los muros reforzados con FRCM el valor de estas propiedades corresponde a los resultados de la homogeneización usando los factores volumétricos del muro (v_w) y del FRCM (v_{FRCM}). Para los dos modelos utilizado se presentan los resultados de rigidez inicial (K_e), la distorsión efectiva (δ_e/h), la distorsión a la carga máxima (δ_{max}/h) y variación de la distorsión a la carga máxima con respecto a los resultados experimentales ($\Delta\delta_{max}$).

En la Tabla 6.4 se muestra una gran diferencia de la distorsión de fallo calculada con el modelo Kwok y Ang con respecto a los resultados experimentales presentados en el capítulo 5. Debido a esto fue necesario realizar ajustes al modelo de Kwok y Ang para tener mejor aproximación con los resultados experimentales obtenidos.

Este ajuste consistió en aplicar un coeficiente experimental de reducción de rigidez inicial de 0.14, esto debido a que la rigidez inicial calculada fue muy superior a la rigidez inicial obtenida experimentalmente. Este coeficiente supone la degradación de la rigidez por carga cíclica hasta llegar al 75% del cortante máximo. Por lo que K_e se calculó con la siguiente ecuación:

$$K_e = 0.14 \frac{GA_n}{h} \quad (6.38)$$

A partir de este valor de rigidez fue posible determinar el valor del desplazamiento efectivo correspondiente a la extrapolación del estado límite de fisuración (δ_e), asumido en el diagrama bilineal idealizado mostrado en el capítulo 5 (ver Figura 5.9).

$$\delta_e = \frac{V_{max}}{K_e} \quad (6.39)$$

Tabla 6.4. Resultados de análisis de deformación de fallo

Refuerzo		Sin refuerzo	Cáñamo	Algodón	Vidrio
Propiedades de materiales	v_{FRCM} (/)	-	0.86	0.86	0.86
	v_m (/)	-	0.14	0.14	0.14
	E (Mpa)	780.00	740.56	647.61	704.22
	G (Mpa)	325.00	308.57	269.84	293.42
	A_n (/)	115200.00	102015.25	101866.09	101959.97
	f'_c (Mpa)	10.80	14.41	14.41	14.41
	σ_{cp} (Mpa)	0.22	0.25	0.25	0.25
Modelo Kwok y Ang	λ_c (/)	15.04	15.64	15.63	15.64
	K_e (KN/mm)	53.49	44.97	39.27	42.74
	δ_{max}/h (%)	1.78	7.59	9.28	7.34
	$\Delta\delta_{max}/h$ (%)	-77.02	-75.81	-143.94	-112.10
Modelo ajustado	K (KN/mm)	7.49	6.30	5.50	5.98
	δ_e/h (%)	0.87	3.58	4.37	3.46
	δ_{max}/h (%)	0.97	4.00	4.90	3.87
	$\Delta\delta_{max}$ (%)	3.03	5.96	-14.95	0.08

Luego a partir de la relación entre la deformación de fallo y la deformación efectiva obtenidas experimentalmente, se determinó otro coeficiente experimental equivalente a 1.12. Por lo que la deformación de fallo es igual a:

$$\delta_{max} = 1.12\delta_e \quad (6.40)$$

Los resultados presentados en la Tabla 6.2 y 6.3 son mejor apreciados en la Figura 6.4, donde se muestran los diagramas bilineales resultantes de los modelos analíticos ajustados presentados en este capítulo en contraste con los resultados experimentales presentado en el capítulo 5.

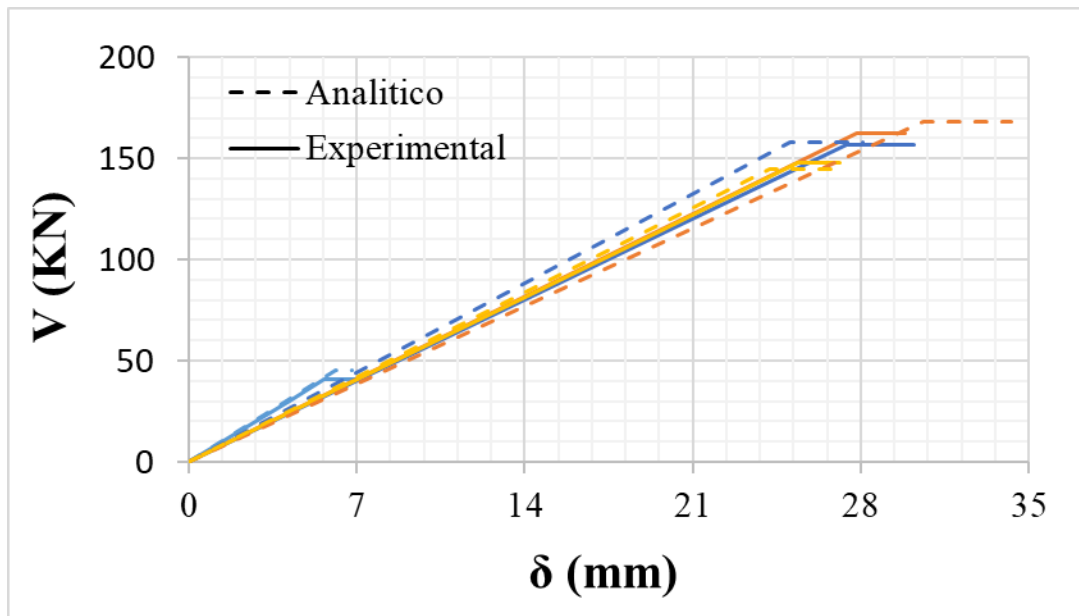


Figura 6.4. Curvas bilineales de modelo analítico y resultados experimentales: azul claro=WN, azul oscuro=WH, naranja=WC, amarillo=WG

Los resultados mostrados en la Figura 6.4 indica una considerable aproximación a los resultados experimentales por parte de los modelos analíticos ajustados presentados en este capítulo. Sin embargo, debido a que los muros reforzados con FRCM de fibras vegetales presentaron fallos por desprendimiento del FRCM, queda en duda la resistencia a cortante y deformación de rotura experimental de los muros si hubieran alcanzado la rotura de la malla. También este modelo analítico tiene el inconveniente de no ser capaz de reproducir el comportamiento histerético de los muros, la degradación de rigidez y así también la cantidad de energía disipada por los muros.

6.4. Conclusiones

A raíz de los ensayos experimentales de los especímenes de FRCM y de muros reforzados con FRCM fue posible comparar sus resultados con los modelos analíticos existentes y proponer nuevas adaptaciones en ellos. A partir de esto se llega a las siguientes conclusiones:

FRCM:

- El modelo ACK no fue efectivo para predecir el comportamiento de los FRCM de fibras vegetales. El aumento progresivo de la tensión a lo largo de la etapa II no es considerado por el modelo ACK y la degradación de la rigidez es menor que la observada en los ensayos experimentales.

- La menor rigidez de la malla en comparación con la rigidez de la matriz en los casos de los especímenes de FRCM de sisal y algodón sometidos a tracción afecta significativamente el comportamiento del compuesto en la etapa I, causando una clara reducción de la tensión de fisuración por tracción.
- Los modelos analíticos ajustados propuestos para el análisis del FRCM a tracción han demostrado una mayor precisión en la predicción de la respuesta experimental que el modelo ACK. Sin embargo, estos no pudieron modelar el aumento progresivo de la tensión a lo largo de la etapa II.

Muros reforzados y sin reforzar con FRCM:

- El modelo ACI 549.4R-13 no fue efectivo para predecir la resistencia de los muros sometidos a carga cíclica. Pues este no considera el aporte de resistencia por parte de la matriz y el incremento de resistencia debido a la capacidad de deformación de la malla.
- El modelo Kwok y Ang tampoco fue efectivo para predecir la distorsión de fallo de los especímenes sometidos a carga cíclica, pues resultan valores de rigidez inicial y desplazamientos de fallo extremadamente altos en comparación con los resultados experimentales
- Los resultados de los modelos ajustados propuestos en este capítulo indica una considerable aproximación a los resultados experimentales, pues a partir de la teoría de la mezcla fue posible introducir los aportes de la matriz de refuerzo y de la capacidad de deformación de la malla. Sin embargo, debido a que los muros reforzados con FRCM de fibras vegetales presentaron fallos por desprendimiento del FRCM, queda en duda los valores experimentales de resistencia a cortante y deformación de fallo, si los muros hubieran alcanzado la rotura de la malla.

Capítulo VII. Modelo Numérico de FRCM a tracción y muros de mampostería reforzados con FRCM sometidos a un ensayo de carga cíclica

7.1. Introducción

Con el objetivo de desarrollar una herramienta de cálculo capaz de reproducir el comportamiento y validar los resultados obtenidos de los ensayos experimentales y de los modelos analíticos, se realizaron modelos numéricos de los especímenes de FRCM sometidos a tracción (capítulo 4), y de los muros de mampostería reforzados y sin reforzar con FRCM sometidos a cargas cíclicas (capítulo 5).

7.2. Modelo numérico del FRCM a tracción

Para la elaboración de este análisis numérico se utilizó el software de análisis estructural Abaqus [54]. Esto por la gran variedad de modelos constitutivos complejos que ofrece, y a los diferentes estudios que han utilizado este software para el análisis de FRCM y hormigón armado [81][82].

Uno de los modelos numérico más utilizados para la simulación de FRCM a tracción es el modelo basado en el daño plástico del hormigón [83][84]. Este modelo comúnmente utilizado para el análisis del hormigón armado, es uno de los modelos constitutivos más complejos que presenta Abaqus. Una de sus principales características es que presenta dos módulos de elasticidad, uno correspondiente a la zona elástica, y otro de descarga que depende de un coeficiente de daño en función del grado de fisuración o plastificación alcanzado.

El modelo es un modelo continuo basado en plasticidad de daños para el hormigón. Se supone que los dos mecanismos principales de falla son la fisuración por tracción y el aplastamiento por compresión del material de hormigón. La evolución de la superficie de rendimiento (o falla) está controlada por dos variables de plastificación ε_t^{pl} y ε_c^{pl} , vinculadas a los mecanismos de falla bajo tracción y compresión, respectivamente. Estas se definen como las deformaciones plásticas equivalentes a la tracción y compresión, respectivamente.

Este modelo asume que la respuesta a tracción y compresión uniaxial del hormigón se caracteriza por una plasticidad dañada, como se muestra en la Figura 7. 1.

Bajo tracción uniaxial, la respuesta de esfuerzo-deformación sigue una relación elástica lineal hasta que se alcanza el valor de la tensión de fisuración σ_{t0} . La tensión de fisuración corresponde a la aparición de microfisuras en el material. A partir de este punto la tensión de tracción que transmite el material no desaparece, sino que va decreciendo paulatinamente a medida que la deformación aumenta. Este comportamiento simula la interacción entre el refuerzo y el hormigón (malla y mortero para el caso del FRCM), y además aporta estabilidad numérica mejorando la convergencia. El punto más destacable es la aparición de una variable de daño d_t , cuyo valor mínimo es 0 (material intacto) y cuyo valor máximo es 1 (material totalmente dañado). Este valor marca la pendiente de la rama de descarga, así si E_0 es el módulo de elasticidad del material elástico, el módulo de la rama de descarga pasa a ser $(1-d_t) E_0$.

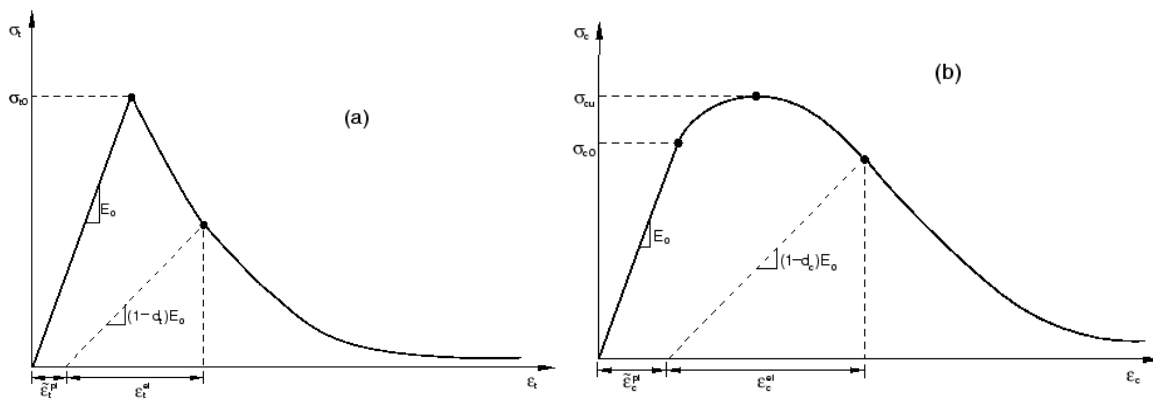


Figura 7. 1. Modelo uniaxial [54]: (a) Tracción, (b) Compresión

Bajo compresión uniaxial, la respuesta es lineal hasta el valor de esfuerzo inicial σ_{c0} . En el régimen plástico, la respuesta se caracteriza típicamente por el endurecimiento por tensión seguido por el debilitación por tensión más allá de la tensión final σ_{cu} . Esta representación,

aunque algo simplificada, captura las características principales de la respuesta del hormigón. Al igual que en el caso de tracción hay un parámetro de daño d_c que varía entre 0 y 1 que reduce la rigidez de la rama de descarga.

Para este caso de estudio solo se utilizó el modelo de daño a tracción, pues se consideró despreciable aporte del modelo de daño a compresión al modelo sometido solo a tracción uniaxial.

7.2.1. Modelo de especímenes de FRCM

Se modelaron 4 especímenes de FRCM, uno por cada tipo de fibras vegetales utilizadas en el capítulo 3 (cáñamo, lino, algodón y sisal). A continuación, se describe la forma de modelado de estos especímenes.

Primero se definió la geometría del espécimen en base a la geometría de los especímenes fabricados en el capítulo 4. Estos fueron de 200mm (longitud libre de los especímenes de FRCM ensayados a tracción en el capítulo 4) de largo, 50mm de ancho y 10mm de espesor. Esta geometría se definió como un elemento sólido deformable.

Para simular las mallas de fibras vegetales se crearon elementos tipos truss. Estos son miembros estructurales largos y delgados que pueden transmitir solo fuerza axial. Estos se utilizan para modelar estructuras delgadas y en forma de línea que admiten la carga solo a lo largo del eje o la línea central del elemento, y no se admiten momentos ni fuerzas perpendiculares a la línea central.

Los elementos tipo truss fueron utilizados en este caso para reducir los elevados costes computacionales que significaría el uso de elementos tridimensionales, así como también problemas de convergencia. En este mismo sentido debido a la buena adherencia que mostraron las mallas de fibras vegetales cubiertas por epoxi con la matriz cementicia en el capítulo 4, fue considerada la malla como embebida en la matriz (sin considerar ningún tipo de deslizamiento en la interacción malla-matriz).

En cada espécimen se utilizaron 4 elementos tipo “truss” utilizados en otros estudios para estos fines [53]. Estos simulaban los cuatro mechones longitudinales de cada malla de fibras vegetales embebida en los especímenes de FRCM del capítulo 4. Los hilos en dirección de la trama no fueron simulados, pues el ensayo era uniaxial, y no consideraba el aporte de adherencias de los hilos colocados en dirección de la trama.

Se definieron dos tipos de materiales, uno correspondiente al sólido deformable que representaba la matriz cementicia, y el otro correspondiente al elemento tipo truss que representaba los mechones en dirección de la urdimbre de las mallas de fibras vegetales.

Para definir el material de la matriz cementicia se eligió el modelo antes mencionado de daño plástico. En este fue necesario definir primero el comportamiento elástico de la matriz cementicia, donde se definió como módulo elástico el módulo de elasticidad obtenido del ensayo experimental de los especímenes de mortero sin malla, presentados en el capítulo 4. Y el coeficiente de Poisson fue asumido igual a 0.2 (sugerido por la EHE [85]).

En caso de la zona plástica de la matriz cementicia fue necesario definir los siguientes parámetros:

Ángulo de expansión: es el ángulo de dilatación medido a alta presión de confinamiento. Este controla una cantidad de la deformación volumétrica plástica desarrollada durante el corte plástico y se asume constante durante la flexibilización plástica. Para la elección de este parámetro primero se utilizó el valor de 13 (utilizado en otro estudio [82]), pero debido a la dificultad de convergencia con este valor, se probaron otros valores, donde el valor de 31 fue el valor que más facilitó la convergencia de los modelos.

Excentricidad: es un parámetro que define la velocidad a la que la función se aproxima a la asíntota (el potencial de flujo tiende a ser una línea recta, mientras que la excentricidad tiende a cero). La excentricidad predeterminada sugerida por Abaqus es de 0.1, lo que implica que el material tenga casi el mismo ángulo de dilatación en un amplio rango de valores de presión de confinamiento.

Parámetro de forma de la superficie de plastificación K: es la relación de la segunda tensión invariante en el meridiano de tracción, a la del meridiano de compresión, en el rendimiento inicial para cualquier valor dado de la presión invariante, de modo que la tensión principal máxima sea negativa, esta debe cumplir la condición $0.5 < K \leq 1.0$, donde el valor predeterminado es igual a $2/3$.

Relación entre la tensión a compresión máxima uniaxial y biaxial: es la relación entre la tensión de rendimiento de la compresión biaxial inicial y la tensión de rendimiento de la compresión uniaxial inicial. Su valor predeterminado es igual a 1.16

Regularización viscoplástica: Los modelos de materiales que exhiben un comportamiento suavizante y una degradación de la rigidez a menudo conducen a graves dificultades de convergencia en los programas de análisis implícito, como Abaqus. Una técnica común para

superar algunas de estas dificultades de convergencia es el uso de una regularización viscoplástica de las ecuaciones constitutivas, lo que hace que la rigidez tangente constante del material suavizante se vuelva positiva durante incrementos de tiempo suficientemente pequeños.

El uso de la regularización viscoplástica con un valor pequeño para el parámetro de viscosidad (pequeño comparado con el incremento de tiempo característico) generalmente ayuda a mejorar la tasa de convergencia del modelo en el régimen de reblandecimiento, sin comprometer los resultados. Para la elección de este valor se probaron los valores de 0.001, 0.002 y 0.003, donde el valor de 0.003 fue el único que permitió la convergencia del modelo.

Una vez definidas estas propiedades se procedía a calcular las curvas de esfuerzo-deformación de la matriz y las variables de daños correspondiente. Debido a que los especímenes estaban sometidos a tracción directa, solo se tomó en cuenta en rango plástico del comportamiento a tracción del mortero. Para calcular estas variables de daño se utilizó el procedimiento publicado por [82]. A continuación, se describe este procedimiento:

1. Los datos de entrada son: la resistencia de compresión (f_{cm}) y a tracción (f_{tm}), y el módulo de elasticidad del mortero (E_{mo}) obtenidos experimentalmente en el capítulo 4, y el tamaño de malla l_{eq} el cual fue igual a 5mm (seleccionado después de utilizar diferentes tipos de mallado).
2. Se calcula la energía de rotura (G_f):

$$G_f = 0.073 f_{cm}^{0.18} \quad (7.1)$$

3. Se calcula la apertura de fisura crítica (w_c):

$$w_c = \frac{5.14 G_f}{f_{tm}} \quad (7.2)$$

4. Se construye la zona de comportamiento plástico del mortero sometido a tracción uniaxial a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\sigma_t(w)}{f_{tm}} = \left[1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2} \quad (7.3)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{tm} + \frac{w}{l_{eq}} \quad (7.4)$$

Donde w es el ancho de fisura.

5. Se calcula los parámetros de daño a tracción (a_t y b_t). Donde a_t será igual a 1, pues f_{tm} y f_{t0} tienen el mismo valor:

$$a_t = 2 \left(\frac{f_{tm}}{f_{t0}} \right) - 1 + 2 \sqrt{\left(\frac{f_{tm}}{f_{t0}} \right)^2 - \frac{f_{tm}}{f_{t0}}} \quad (7.5)$$

$$b_t = \frac{0.453 f_{ck}^{2/3}}{G_f} l_{eq} \quad (7.6)$$

6. Finalmente se calculan las variables de daño a tracción (d_t)

$$d_t = 1 - \frac{1}{2 + a_t} [2(1 + a_t) \exp(-b_t \varepsilon_t^{ck}) - a_t \exp(-2b_t \varepsilon_t^{ck})] \quad (7.7)$$

En la Figura 7.2 se muestra el diagrama de esfuerzo-deformación calculado a partir del procedimiento menciona anteriormente.

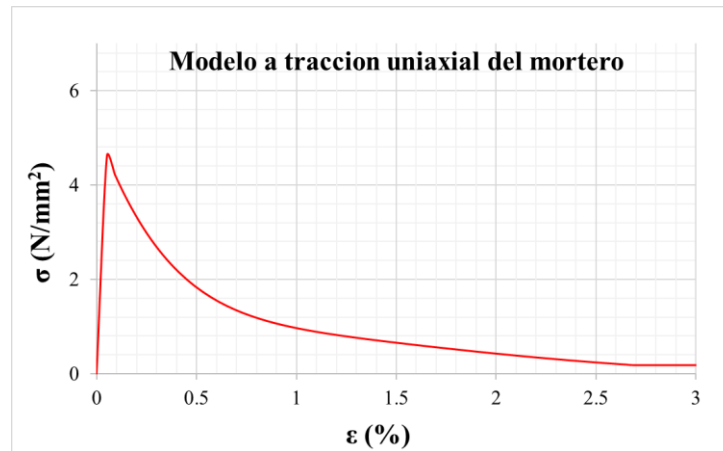


Figura 7.2. Modelo a tracción uniaxial del mortero

Luego de calcular e introducir los datos de esfuerzo-deformación de la zona plástica y las variables de daños del mortero en Abaqus, y concluida la definición de los materiales, se procedía a establecer las condiciones de contorno.

Para esto se fijó (restricción de desplazamiento en todas las direcciones) unas de las caras transversales del modelo de mortero (sólido deformable), y se le impuso un desplazamiento en la cara opuesta equivalente a la capacidad de deformación del tipo de malla simulada (en el caso del algodón fue necesario aumentar el desplazamiento impuesto para alcanzar la tensión de rotura de la malla).

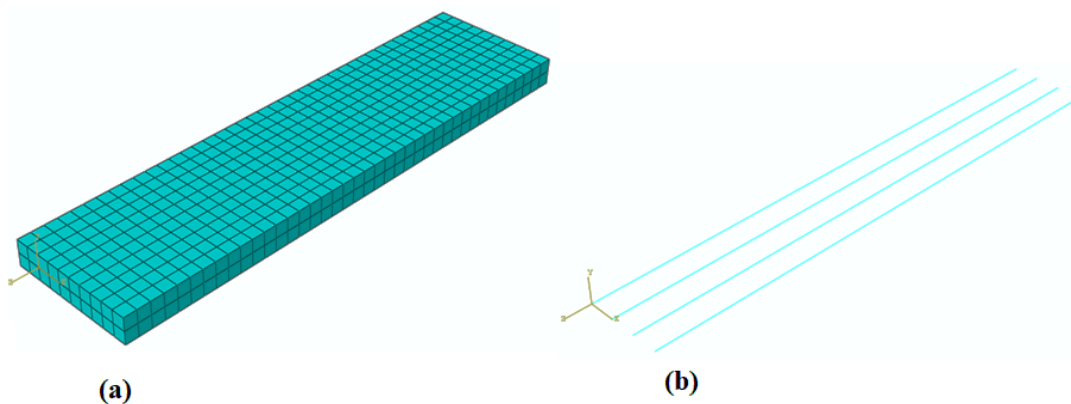


Figura 7. 3. Mallado de FRCM: (a) Sólido deformable, (b) Elemento tipo truss

Luego se definió el mallado del modelo. Para ello se probaron un mallado de 2 mm y de 5 mm, en los dos tipos de mallado no se observó una diferencia significativa en los resultados (3 % de variación con respecto a la deformación de fallo). Sin embargo, el tiempo requerido

de cálculo fue menor en el caso del mallado de 5 mm (2 minutos), en comparación con el mallado de 2 mm (15 minutos). En base a esto se eligió el tamaño de cada elemento igual 5 mm tanto en los elementos tipos truss como en el sólido deformable. A raíz de este mallado se obtuvieron un total de 800 elementos para el sólido deformable y 160 elementos para los elementos tipo truss.

Una vez definida la malla se procedía realizar el análisis estructural.

7.2.2. Resultados de Modelos de FRCM

Para identificar la ruptura en los modelos de FRCM de fibras vegetales se tomó como criterio de fallo la tensión de rotura de cada malla (obtenida experimentalmente en el capítulo 3).

En la Figura 7.4 muestra las tensiones soportada por el mortero cuando se alcanza la tensión de rotura de la malla. En esta se observa como la matriz que menos daños sufre es la de cáñamo, seguida por la de lino, sisal y algodón. Este orden corresponde al mayor desplazamiento aplicado para cada caso, que a su vez dependió de la capacidad de deformación de la malla.

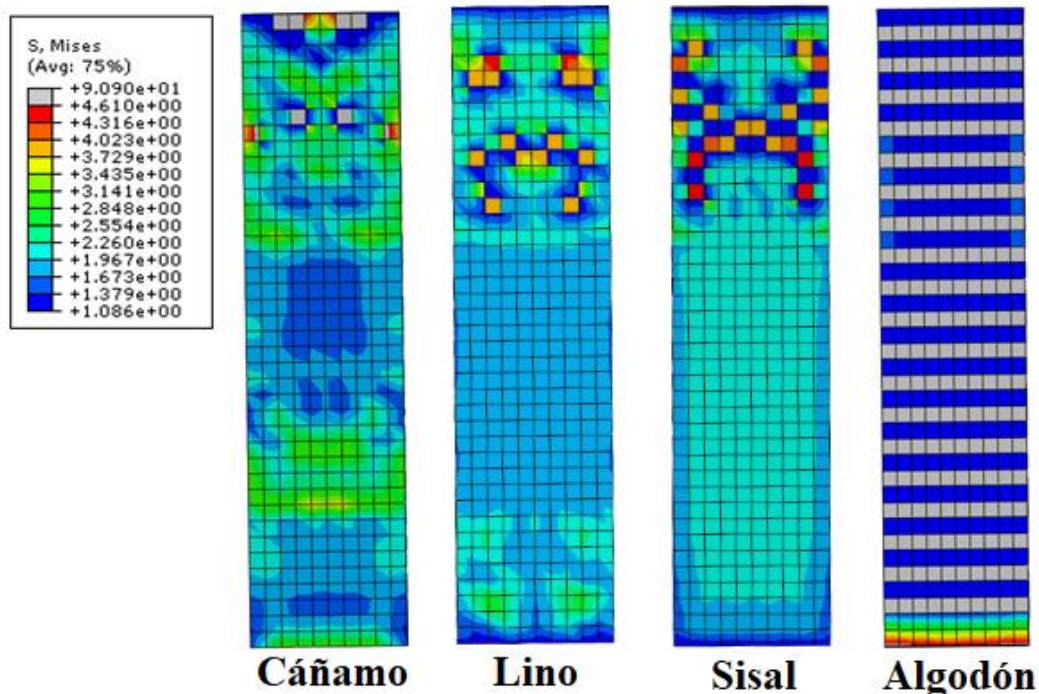


Figura 7.4. Fallos de modelos de FRCM

Los resultados de cada uno de los modelos se presentan en la Tabla 7.1. En esta se muestran los resultados de tensión de fisuración (σ_{mc}) y última (σ_{cu}), obtenidas para cada modelo a partir de la relación entre la fuerza de reacción (obtenido por Abaqus) y el área de sección bruta del FRCM (500mm^2) para la tensión de fisuración, y el área de sección transversal de la malla para el caso de la tensión última. Juntos con éstas también se presenta el porcentaje de variación con respecto a los resultados experimentales (Δ_{exp}) y analíticos (Δ_a).

Tabla 7.1. Resultados de modelos numéricos de FRCM

Fibras	Cáñamo	Lino	Sisal		Algodón		
Modelo	1	1	1	2	1	2	3
σ_{mc} (MPa)	4.97	4.90	5.08	3.81	5.73	5.75	4.31
Δ_{exp} (%)	-9.71	11.92	30.82	-1.89	104.69	105.30	53.98
Δ_a (%)	3.03	2.13	52.42	14.32	76.35	76.88	32.66
σ_{cu} (MPa)	575.39	668.03	120.36	90.27	145.66	140.54	105.40
Δ_{exp} (%)	3.81	desp	desp	desp	51.83	46.48	9.86
Δ_a (%)	10.50	5.94	7.98	-19.01	58.32	52.75	14.56
E_I (MPa)	9.25	9.25	9.31	6.98	8.42	8.25	6.19
Δ_{exp} (%)	-56.99	-32.64	-44.37	-58.28	35.36	32.63	-0.53
Δ_a (%)	-0.77	-0.45	8.28	-18.79	0.35	-1.67	-26.25
E_{III} (MPa)	35.49	34.24	4.89	3.67	1.75	0.76	0.57
Δ_{exp} (%)	-23.14	desp	desp	desp	231.13	44.27	8.21
Δ_a (%)	14.31	-36.76	-12.77	-34.58	230.64	44.06	8.05

desp= ensayos experimentales que fallaron por desprendimiento del mortero

También se muestran los módulos de elasticidad de la zona 1 (E_I) y 3 (E_{III}) obtenidos a partir de las pendientes de estas zonas en los diagramas de esfuerzo-deformación (ver Figura 7.5). En cálculo de E_I se utilizó el área de sección transversal bruta del FRCM, y para el cálculo de E_{III} el área de sección transversal de la malla.

El porcentaje de variación para la tensión última, y módulo de elasticidad de la zona 3, no fue calculado en los casos de resultados experimentales donde hubo desprendimiento de mortero, debido a que este tipo de fallo no fue considerado en los modelos numéricos, ni en los analíticos. Esto debido a que el fallo por desprendimiento del mortero es un fallo debido a la falta de compatibilidad de los materiales que componen el FRCM (malla y mortero), y no corresponde al tipo de fallo esperado en el FRCM.

El número de modelo indica los modelos realizados por cada tipo de fibras. Para el caso del cáñamo y el lino solo fue utilizado un modelo, debido a que los resultados obtenidos con este

se aproximaron a bastante a los resultados experimentales y analíticos. Sin embargo, en el caso del sisal fue necesario un segundo modelo y en el de algodón un segundo y un tercer modelo.

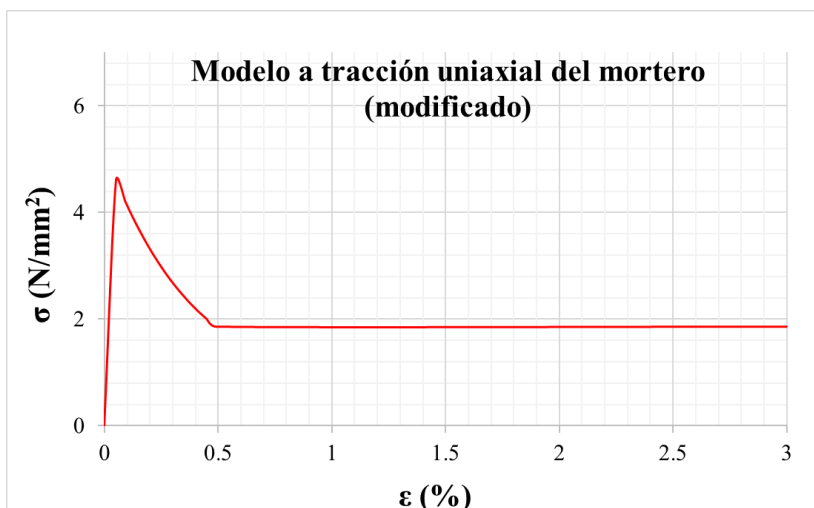


Figura 7.5. Modelo a tracción uniaxial modificado

Como se muestra en la Tabla 7.1 en el caso del algodón se observa un comportamiento diferente al obtenido experimental y analíticamente. Pues en el caso del modelo numérico se observa una caída muy brusca de las tensiones una vez alcanzada la tensión de fisuración, y una pendiente de recuperación de tensiones muy pronunciada.

La caída brusca de tensiones puede deberse al bajo módulo de elasticidad del algodón (esta caída también es apreciable en los datos experimentales), lo cual evita la pronta recuperación de las tensiones, y la pendiente más pronunciada se debe a que el modelo de comportamiento uniaxial asumido del mortero ya está muy debilitado debido a la capacidad de deformación de la malla.

Para este caso fue necesario modificar el modelo uniaxial del mortero (Figura 7.5), suponiendo una tensión de fisuración constante al llegar al 60% de degradación de la tensión de fisuración (ver Figura 7.5 y 7.6). Esto supuso que el aumento progresivo de las tensiones en el algodón se vea afectado por la rigidez del mortero que siguió soportando carga hasta la tensión de rotura de la malla (Figura 7.6: modelo 2).

En el caso del algodón (modelo 1 y 2) y del sisal (modelo 1), las tensiones de fisuración y última fueron bastantes superiores a las tensiones obtenidas experimental y analíticamente. Por lo que fue necesario utilizar el coeficiente de reducción de tensión de fisuración (0.75)

utilizado en la ecuación 6.13 (capítulo 6), para los casos en que el módulo de elasticidad de la malla es menor que el de la matriz (ver Figura 7.6).

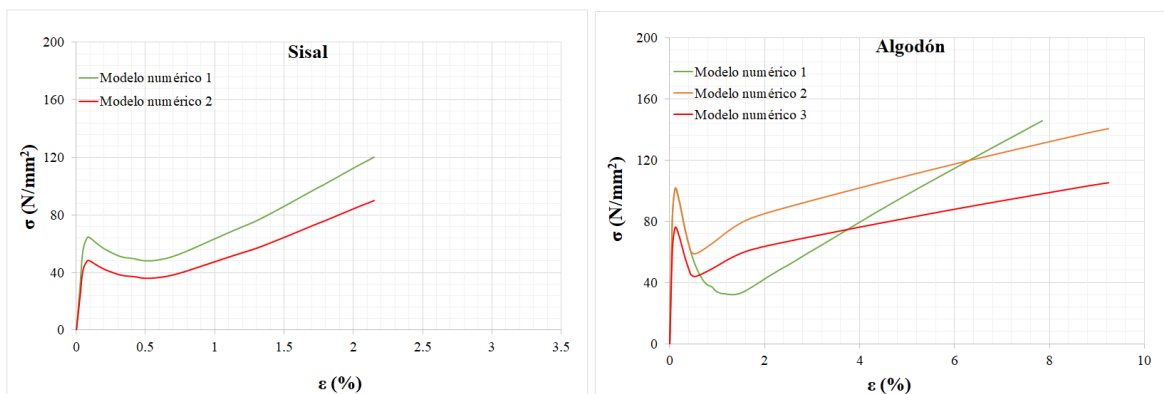


Figura 7.6. Modelos modificados de FRCM de sisal y algodón

Los resultados presentados en la Tabla 7.1, son mejor apreciados en los diagramas de esfuerzo-deformación de la Figura 7.7. En esta se muestra la comparación de los modelos numéricos con los resultados experimentales y analíticos.

En la Figura 7.7 se muestra una mejor aproximación a los resultados analíticos que a los experimentales. Pues el modelo numérico tampoco fue capaz de reproducir el incremento inestable de tensiones debido a la interacción malla-matriz en la zona II.

A continuación, se analiza para cada tipo de fibras las variaciones entre los resultados de los modelos numéricos con respecto a los resultados experimentales y analíticos.

FRCM-cáñamo: En este caso se presentaron variación con respeto a los resultados experimentales y analítico entre 3 y 10 % para las tensiones de fisuración y última. En el caso de los módulos de elasticidad también se presentaron variaciones bastante próximas a los resultados analíticos (0.8 y 14%), pero con respecto los resultados experimentales estos presentan variaciones muy altas (23 y 57%), lo cual puede deberse los altos coeficientes de variación presentados por los datos experimentales (ver Tabla 4.2).

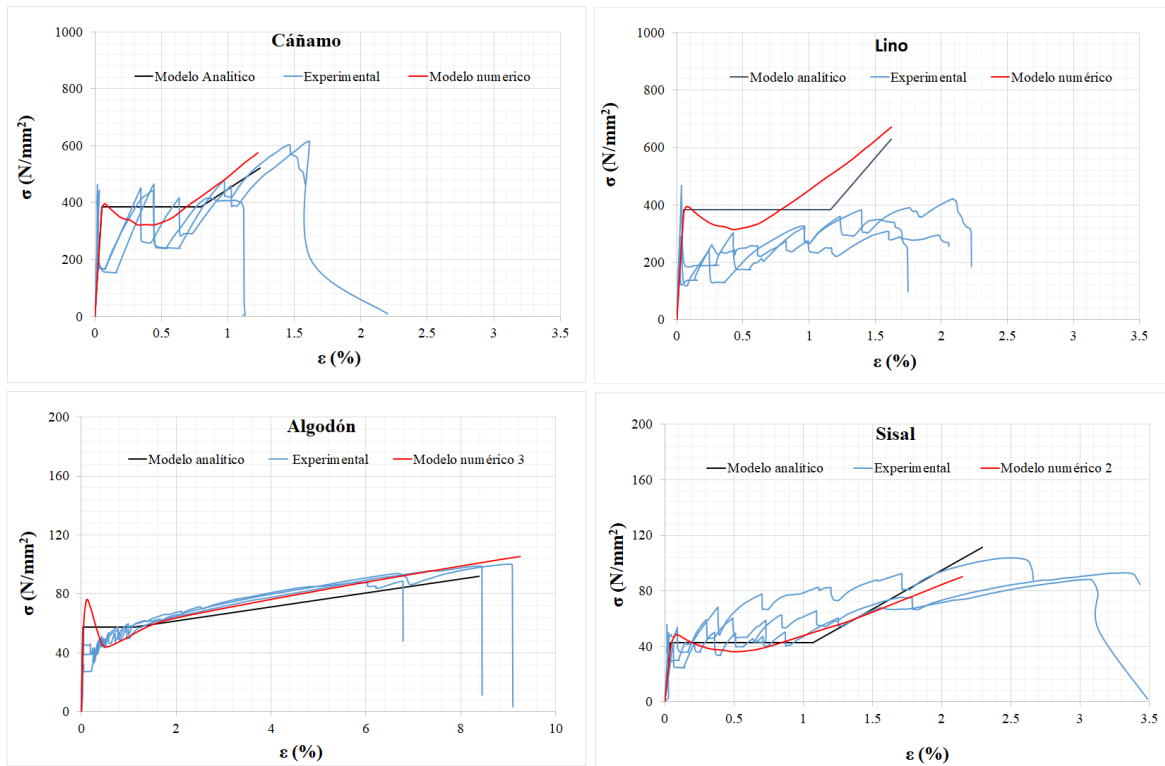


Figura 7.7. Diagrama esfuerzo-deformación de especímenes de FRCM a tracción

FRCM-lino: En este al igual que en el cáñamo la variación con los resultados analíticos para la tensión ultima, tensión de fisuración y módulo de la zona I fue bastante baja. Sin embargo, en cuanto a los resultados experimentales, se observa altas variaciones, esto debido a los posibles deslizamientos entre malla-matriz, evidenciados por los fallos por desprendimiento presentados en estos tipos de espécimen.

Sisal: En este caso al igual que en el lino la variación con los datos experimentales es muy alta debido al fallo por desprendimiento ocurridos en estos especímenes. Sin embargo, en el caso del modelo 2 del sisal fue posible aproximarse bastante a la tensión de fisuración experimental y analítica, aunque en los demás casos presentó variaciones más altas que el modelo 1 con respecto a los resultados analíticos.

Algodón: en el caso del modelo 3 de algodón en todas las propiedades se lograron variaciones más bajas que en los demás modelos de algodón, con excepción del módulo de elasticidad en la zona I, el cual presentó una variación más alta en comparación con los resultados analíticos. A pesar de esto la tensión de fisuración del modelo 3 también presentó

altas variaciones con respecto a los resultados experimentales y analíticos (54 y 32%). Sin embargo, en los demás casos se presentaron variaciones entre 0.5 y 15%.

En general los modelos numéricos presentados en este capítulo fueron capaces de simular de manera aproximada (con excepción de modelo 1 y 2 del FRCM de algodón) el comportamiento analítico y experimental (con excepción de los que fallaron por desprendimiento) presentado en capítulos anteriores. Por lo que estos modelos representan una herramienta de cálculo efectiva para el análisis de FRCM de fibras vegetales donde la interacción entre malla y matriz sea lo suficientemente buena para impedir los fallos por deslizamiento o desprendimiento del mortero. Además el tiempo de duración de cada análisis numérico fue de aproximadamente 2 minutos, lo que representa un bajo costo computacional.

7.3. Modelo numérico de muros de mampostería reforzados y sin reforzar con FRCM sometidos a cargas cíclicas

Para este estudio fue utilizado un modelo de micro escala simplificada (ver capítulo 2). Para evitar los costos computacionales que supone el uso de elementos cohesivos, en este estudio no se consideró la interface de la junta de mortero. Pues se asumió el contacto directo entre las unidades de mampostería. Tomando la geometría de la junta como parte de las unidades de mampostería, y asignándole a las superficies de contacto entre las unidades, las propiedades obtenida experimentalmente de muros de mampostería presentados en la Tabla 5.1 (coeficiente de fricción y tensión de adherencia).

Para la elaboración de este análisis numérico se utilizó el mismo software utilizado en el apartado anterior para la simulación del FRCM (Abaqus). Con este se analizaron 4 tipos de muros: uno sin reforzar, uno reforzado con FRCM de cáñamo, uno reforzado con FRCM de algodón, y otro reforzado con FRCM de fibra de vidrio.

7.3.1. Modelo de muro sin reforzar

Para este análisis se crearon sólidos deformables con las dimensiones equivalentes a la geometría de los ladrillos utilizados en elaboración de los muros presentados en el capítulo 5 (ver Figura 7.8a). Asumiendo las dimensiones de las juntas (1cm) como parte de los ladrillos. Después de crear estos sólidos, estos fueron ensamblados formando un muro de 90×72cm.

Luego de probar dos mallados uno de 64 mm (mitad del ancho de ladrillo) y 32 mm (mitad de 64), se escogió el mallado de 64 mm, pues no se logró la convergencia con el mallado de 32 mm. Con la mallado de 64 mm se crearon un total de 312 elementos (ver Figura 7.8).

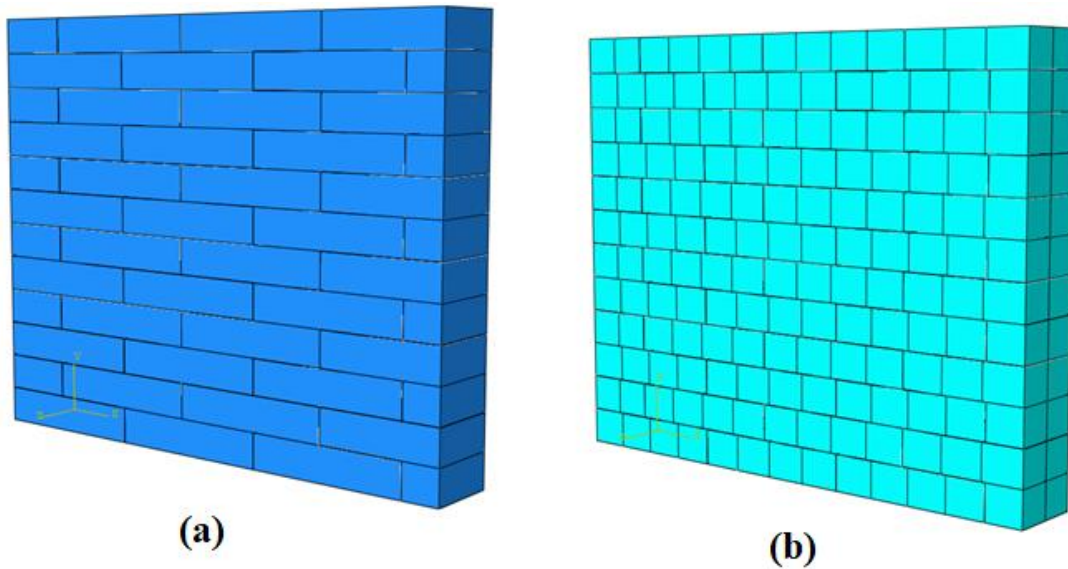


Figura 7.8. Modelo numérico de muro de mampostería sin reforzar: (a) sin mallar, (b) mallado

Para definir las propiedades de los sólidos se utilizó el modelo basado en el daño plástico del hormigón mencionado anteriormente. Aunque para este caso no se consideraron las variables de daño, debido a la no convergencia del modelo al utilizar estas variables.

Para estos sólidos deformables se asumió como resistencia a compresión y a tracción los valores obtenidos del ensayo experimental a compresión de la mampostería presentado en el capítulo 5. Pero debido a la dificultad de convergencia del modelo con el módulo de elasticidad (bastante bajo) obtenido experimentalmente (780MPa), se utilizó un módulo de elasticidad (E_w) obtenido a partir de la ecuación de la EHE-08 [85], utilizada para el hormigón:

$$E_w = 8500 \sqrt[3]{f_{cma}} \quad (7.41)$$

Luego se definieron los contactos entre las superficies de los sólidos deformables (ladrillos) en interacción, donde se estableció el comportamiento a tensiones tangenciales. Para ello estableció como coeficiente de fricción el valor 0.73 y como la tensión de adherencia el valor de 0.36, los cuales fueron obtenidos experimentalmente (ver Tabla 5.1).

Una vez definidos los contactos entre ladrillos, se establecieron las condiciones de contorno de acuerdo a la configuración de ensayo por carga cíclica presentados en el capítulo 5.

Para definir las condiciones de contorno en la parte superior del muro, fue necesario determinar el desplazamiento del muro debido a la carga vertical aplicada de 25 KN. Esto debido a la dificultad que supone establecer las condiciones de contorno aplicando la carga vertical y restringiendo los desplazamientos verticales (dirección “y”) a la misma vez. Bajo esta carga se produjo un desplazamiento de 0.01 mm en dirección “y”.

Conocido este desplazamiento fue posible definir las condiciones de contorno en la parte superior del muro. Donde se restringieron los desplazamientos en dirección “x” y “z”, y se impuso el desplazamiento de 0.01mm en dirección “y”. Sin embargo, este desplazamiento no pudo mantener la estabilidad del modelo durante el proceso de análisis, por lo que fue necesario aumentarlo gradualmente hasta alcanzar la estabilidad del modelo. Como resultado se obtuvo un desplazamiento de 0.07mm. Este valor representa un mayor nivel de carga de compresión, pero si se considera que en los ensayos experimentales el desplazamiento en “y” estaba restringido, y en las células de carga se registraron cargas mayores de 25 KN para cada ciclo, es justificada la necesidad de aumentar la carga.

En la parte inferior se restringieron los desplazamientos en dirección “y” y “z”, y se impusieron los desplazamientos cíclicos definidos en el capítulo 5, pero limitando la distorsión última aplicada en el muro, a la distorsión a la carga máxima determinada en el capítulo 6 (modelo analítico).

7.3.2. Modelo de muros reforzados

Para el caso de los muros reforzados se utilizó el mismo modelo de muro sin reforzar, con la diferencia de que se agregaron elementos tipo shell para la simular el refuerzo de FRCM en cada caso (elementos utilizados por Zhang et al. [43] para simular muros de mampostería reforzados con FRP).

Los elementos tipo shell se utilizan para modelar estructuras en las que una de las dimensiones es significativamente menor que las otras dimensiones, y las tensiones en la dirección del espesor son insignificantes.

Abaqus ofrece dos tipos de elementos shell: elementos shell convencionales y elementos shell continuos.

Elementos shell convencionales: discretizan una superficie de referencia al definir las dimensiones planas del elemento, su superficie normal y su curvatura inicial.

Elementos shell continuos: se asemejan a los elementos sólidos tridimensionales en el sentido de que discretizan todo un cuerpo tridimensional, pero están formulados de tal manera que su comportamiento cinemático y constitutivo es similar al de los elementos shell convencionales. Este fue el utilizado para modelar el FRCM por la mejor capacidad de reproducir sus condiciones reales.

En estos elementos también se utilizó el modelo basado en el daño plástico del hormigón mencionado anteriormente.

Para definir las propiedades de cada FRCM fue necesario realizar un modelo del FRCM con las dimensiones del refuerzo (malla y mortero), y determinar su comportamiento a tracción según el procedimiento descrito en el apartado 7.2. Una vez obtenido la curva de esfuerzo-deformación (ver Figura 7. 9) de cada tipo de FRCM a tracción (cáñamo, algodón y vidrio), se introdujeron los datos de tensiones y deformaciones plásticas del FRCM a tracción, y así también el módulo de elasticidad en la zona inicial, obtenido a partir de la misma curva esfuerzo-deformación del modelo numérico del FRCM.

En el caso de la resistencia a compresión del FRCM ($f_{c,cm}$), esta fue definida a partir de la teoría de la mezcla sin tomar en cuenta el aporte de las mallas a compresión (ver ecuación 7.9):

$$f_{c,cm} = f_{cm}v_m \quad (7.9)$$

Para la interacción entre los elementos tipos shell (FRCM) y los sólidos deformables (ladrillos) fue utilizada una conexión tipo “tie”, utilizada en otros estudios para fines de mantener la simplicidad del modelo [53][43]. Esta es una restricción de enlace que permite fusionar dos regiones a pesar de que las mallas creadas en las superficies de las regiones puedan ser diferentes. Por lo que se supuso una unión total (o adhesión) entre la superficie de la mampostería y el FRCM.

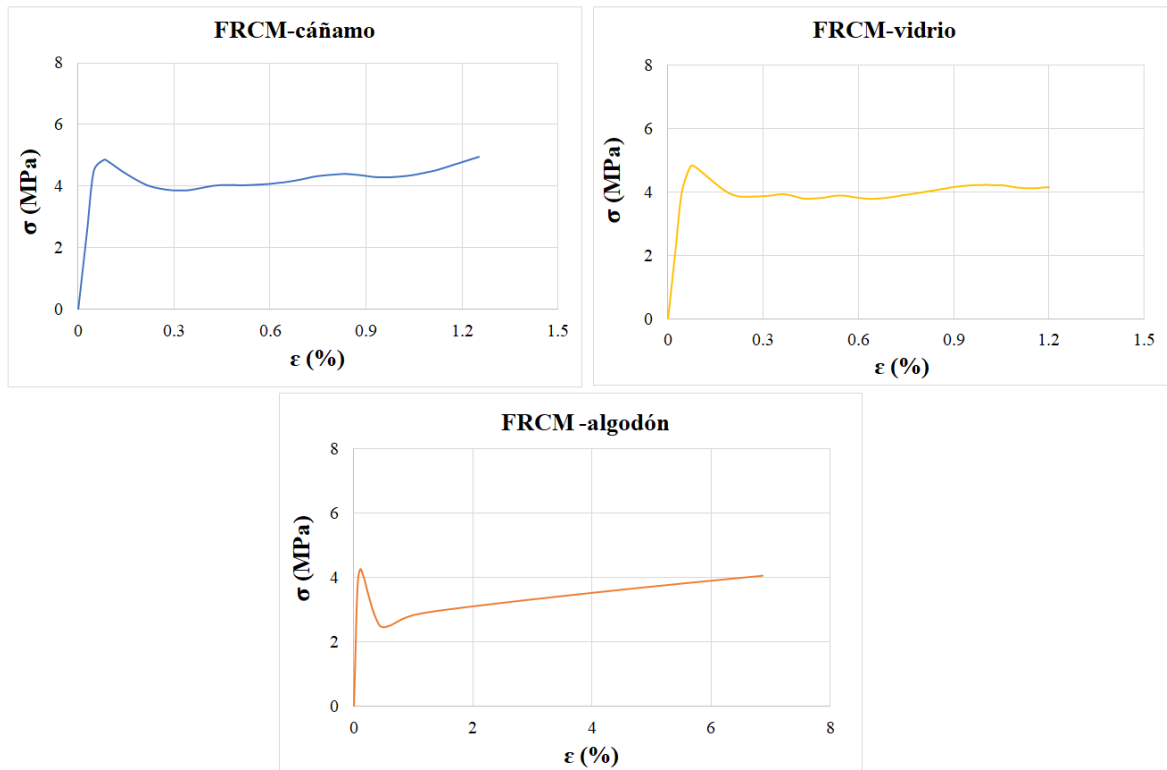


Figura 7. 9. Curva esfuerzo-deformación de FRCM sometidos a tracción

Debido a este tipo de contacto, las fuerzas de reacción alcanzadas por los muros eran muy elevadas. Por lo que fue necesario debilitar sistema de FRCM, dividiendo el elemento tipo shell en elementos triangulares (ver Figura 7.10a), que quedaban definidos por las diagonales del muro (referencia de fallo por cortante).

Cada elemento tipo shell era enlazado a la zona del muro correspondiente, con el contacto tipo tie mencionado anteriormente. Estas eran unidas entre ellas con unos strips tipo shell (ver Figura 7.10b) con las mismas propiedades de estos elementos triangulares, con un ancho de 10mm (el mínimo permitido por Abaqus). Estos strips fueron necesarios para asegurar la transmisión de carga entre los elementos triangulares que representaban el FRCM, restringiendo a la vez el desplazamiento independiente de las secciones correspondientes a cada elemento triangular.

Tanto para los elementos triangulares y strips tipo shell, el mallado fue de 64mm (definido con el mismo criterio del mallado de los muros), creando un total de 416 elementos por todos los elementos triangulares, y 74 elementos por todos los strips. En la Figura 7.10 se muestra

como los nodos de la malla no coinciden con los del muro, pero como se mencionó anteriormente, ésta es una de las facilidades que permite el contacto tipo “tie”.

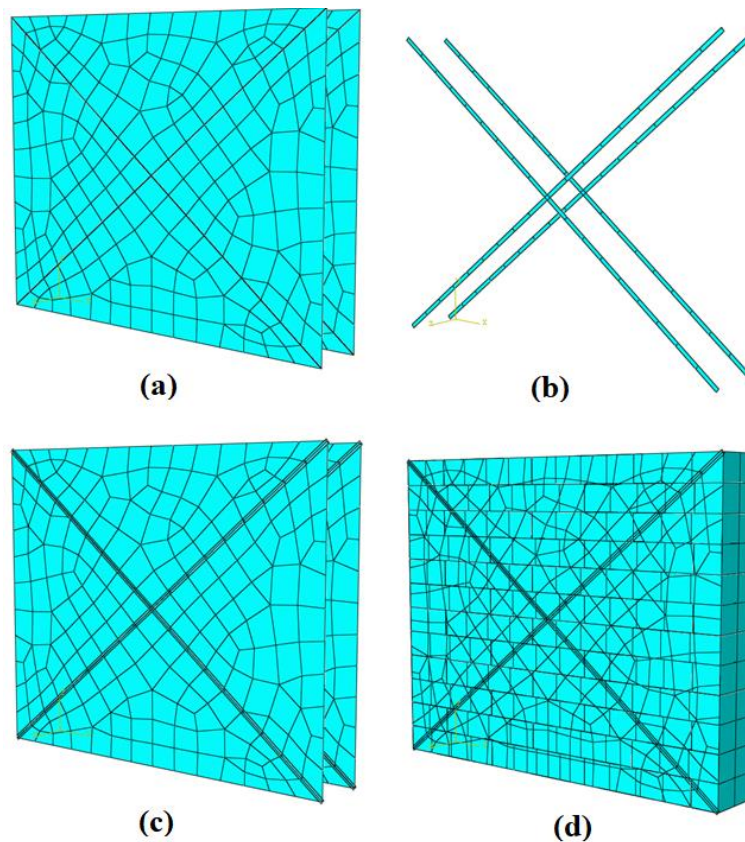


Figura 7.10. Mallado de muros reforzados con FRCM: (a) Elementos triangulares de refuerzo, (b) Strips, (c) Refuerzo (FRM), (d) Muro reforzado con FRCM

Para los modelos de muros reforzados con FRCM se utilizaron las mismas condiciones de contorno utilizada en los muros sin reforzar.

7.3.3. Resultados de modelos de muros reforzados y sin reforzar con FRCM

Una vez definidos los modelos numéricos de cada muro, éstos eran analizados bajo las condiciones de carga explicada anteriormente. Como criterio de fallo se consideró el alcance de la distorsión a la carga máxima calculada en el capítulo 6 para cada tipo muro. Esto debido a que en la definición de los materiales del modelo no se estableció ningún criterio de fallo.

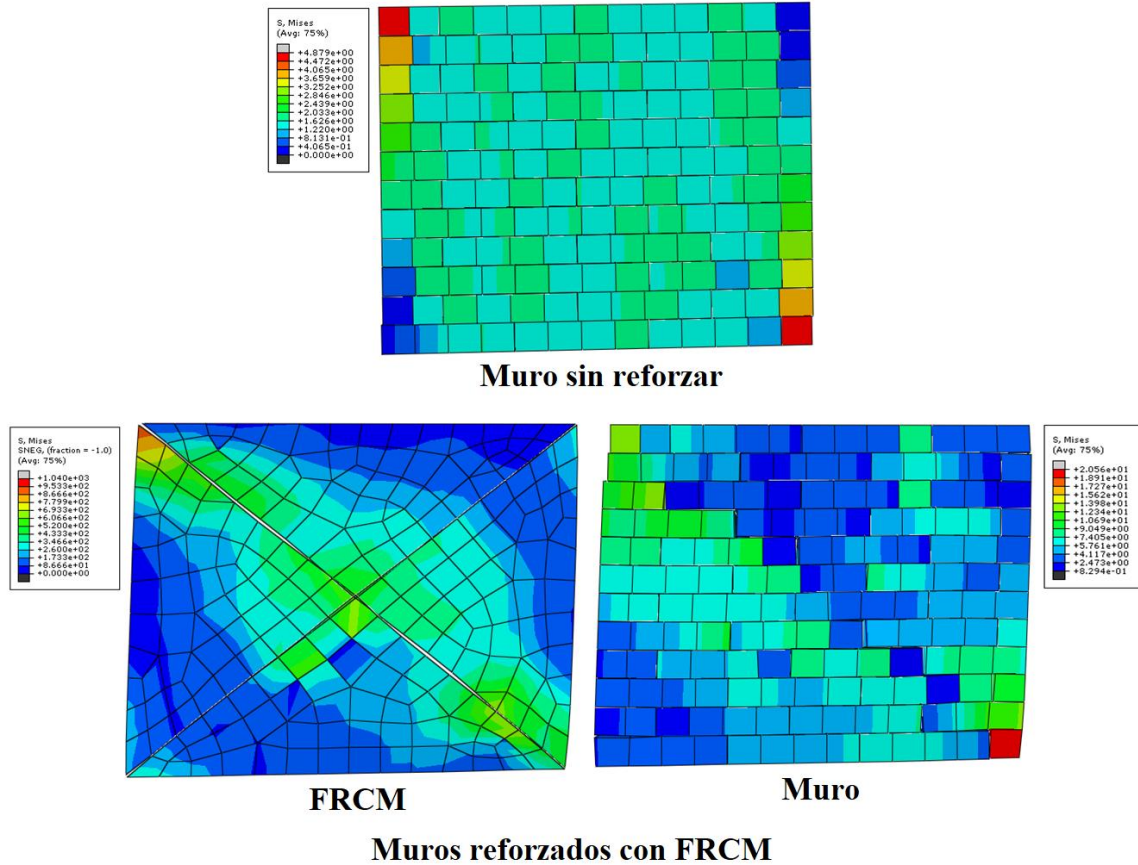


Figura 7.11. Fallos de muros reforzados y sin reforzar

En la Figura 7.11 se muestran los estados tensionales de los muros reforzados y sin reforzar al momento de alcanzar la distorsión a la carga máxima. La imagen de los muros reforzados presentada en la figura representa el estado tensional de todos los modelos de muros reforzados, donde se alcanzaron tensiones superiores a los 953 MPa en el refuerzo, y a los 19 MPa en el muro.

En el caso del muro sin reforzar se observa como las esquinas son los puntos más tensionados del muro, alcanzando tensiones máximas de 4.9 MPa. Esto mismo ocurre en los muros reforzados con FRCM, con la diferencia de que en estos se alcanza una apertura significativa de algunos contactos y la separación del refuerzo en dirección diagonal.

La apertura máxima de los contactos para cada muro se muestra en la Figura 7.12. En esta se muestra como los contactos que más se abren son los de los muros a los cuales se le aplicó mayor desplazamiento. Se alcanzaron aberturas máximas de 8.33mm para los muros con FRCM de algodón, 6.82mm para los muros con FRCM de cáñamo, 6.68 mm para los muros

con FRCM de vidrio y 0.1mm para muros sin reforzar. las mayores aberturas de contactos en los muros reforzados con FRCM de cáñamo y algodón se debe a la mayor capacidad de deformación de estas mallas, pues dependiendo de la capacidad de alargamiento de la malla el muro alcanzara mayor abertura de los contactos o fisuras, permitiendo con ello disipar mayor cantidad de energía (como se presenta en el capítulo 5).

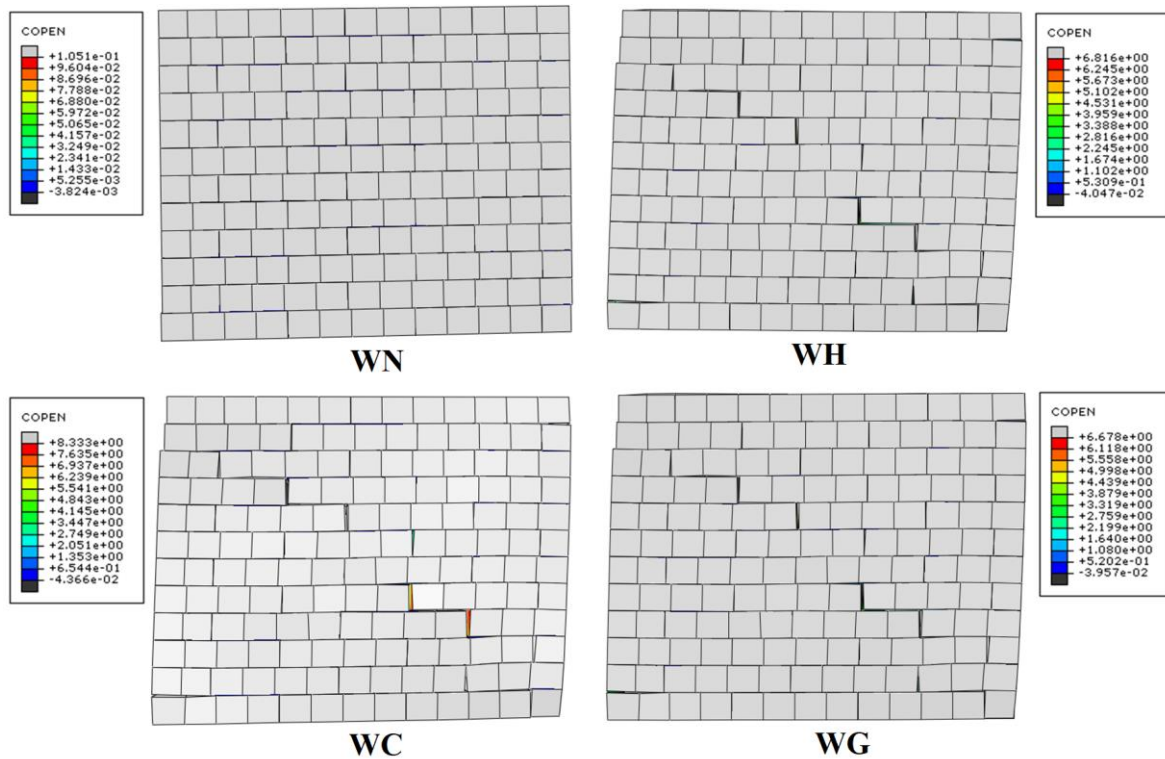


Figura 7.12. Apertura de contactos en muros de mampostería

En la Tabla 7.2 se presentan los resultados del análisis numérico de los muros reforzados y sin reforzar con FRCM. En esta se presentan el cortante máximo (V_{max}) obtenido de la fuerza de reacción de los modelos, la distorsión en el cortante máximo (δ_{max}/h), el coeficiente de rigidez en la zona elástica (K_e), y la energía disipada (E_d). Además, se presenta la variación de estos resultados con respecto a los obtenidos experimentalmente (Δ_{exp}) y del modelo analítico (Δ_a).

A continuación, se analiza la variación de los resultados de los modelos numéricos con respecto los resultados experimentales y analíticos para cada tipo de muros.

Muros sin reforzar: en este caso el modelo obtuvo un cortante máximo, una dispersión a carga máxima y una disipación de energía total aproximado a los resultados experimentales

y analíticos, con variación de entre 2 y 14%. Sin embargo, en el caso de la rigidez elástica se observa una variación muy elevada, lo cual indica que el modelo presenta una mayor rigidez que los resultados experimentales y analíticos. Esto puede deberse al mayor módulo de elasticidad usado en el modelo (18788.56 MPa), calculado a partir de la ecuación 7.7. Este fue necesario para darle estabilidad al modelo y facilitar la convergencia.

Tabla 7.2. Resultados de modelo numérico de muros reforzados y sin reforzar con FRCM

Muros	WN	WH	WC	WG
V_{max} (KN)	41.31	135.71	142.73	134.82
Δ_{exp} (%)	-1.91	13.32	12.09	8.74
Δ_a (%)	9.36	13.99	15.20	6.91
δ_{max}/h (%)	0.88	3.97	4.86	3.86
Δ_{exp} (%)	12.51	8.11	-14.05	0.32
Δ_a (%)	9.82	0.93	0.79	0.24
K_e (KN/mm)	11.43	6.86	5.80	6.94
Δ_{exp} (%)	-57.65	-19.86	0.79	-18.63
Δ_a (%)	-52.60	-8.82	-5.53	-16.05
E_d (KN-mm)	554.39	16907.81	18774.64	16755.26
Δ_{exp} (%)	-14.41	-89.96	-82.60	-135.57

Muros reforzados con FRCM: Los modelos para cada tipo de fibra fueron capaces de obtener valores de cortante máximo, distorsión a cortante máximo y rigidez, suficientemente próximos a los resultados experimentales y analíticos, con variaciones entre 0 y 20%. Sin embargo, en el caso de la energía total disipada los modelos obtuvieron unos valores muy superiores a los resultados experimentales. Esto puede deberse a la mayor rigidez inicial presentada por los modelos (ver Figura 7.14), pues inicialmente bajo los mismos desplazamientos los modelos alcanzan mayores niveles de carga que los obtenidos experimentalmente.

Los resultados presentados en la Tabla 7.1 son mejor apreciados en las Figura 7.13, 7.14 y 7.15. Estos gráficos fueron obtenidos según los procedimientos de cálculos explicados en el capítulo 5.

Diagramas de histéresis: la Figura 7.13 muestra la comparación de los diagramas de histéresis obtenidos de los modelos numéricos y los obtenidos experimentalmente. En esta se muestra como los resultados obtenidos de los modelos numérico se ajustan bastante con los resultados experimentales. Sin embargo, se aprecia como en el modelo numérico se

presentan mayores deformaciones permanentes que en los ensayos experimentales (por el mayor ancho de la curva de histéresis en la zona próxima a 0). Esto indica la incapacidad del modelo de reproducir las aperturas reversibles de fisuras que se presentan los ensayos experimentales.

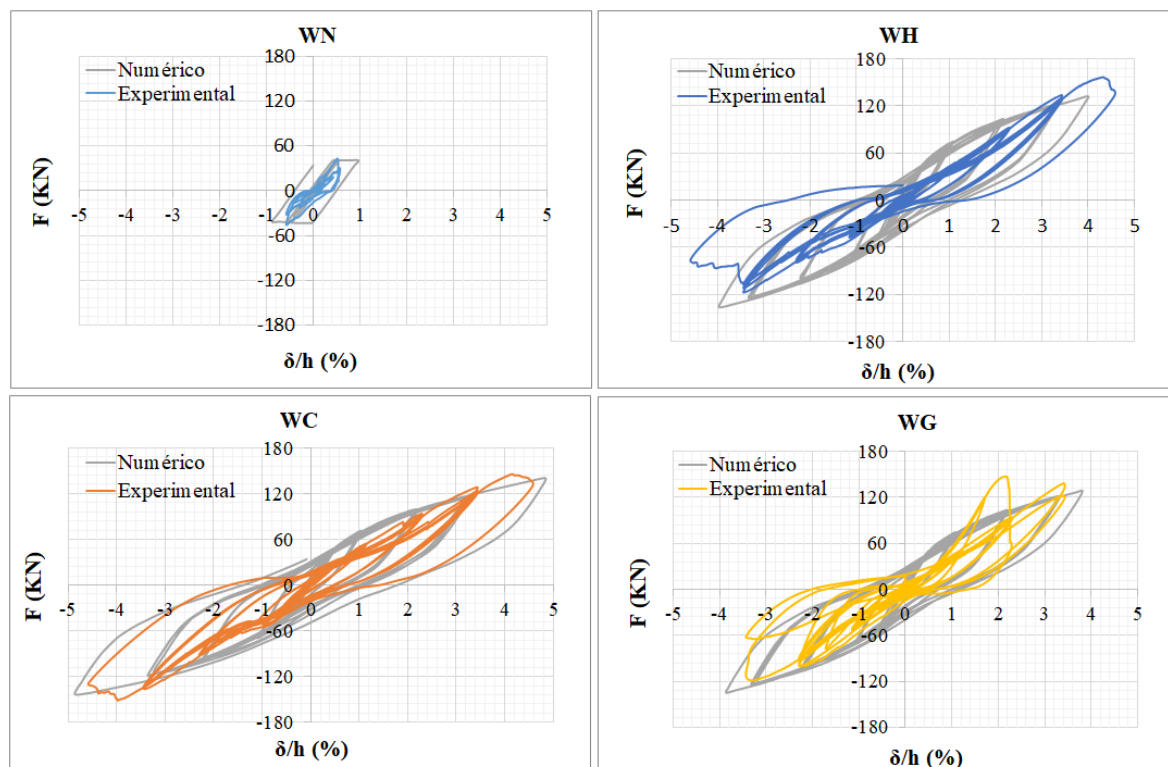


Figura 7.13. Comparación de diagramas de histéresis de muros reforzados y sin reforzar con FRCM

También se aprecia como durante los primeros ciclos el modelo numérico presenta mayor rigidez, pero a medida que aumentan las distorsiones se va ajustando mejor a los resultados experimentales.

De los diagramas de histéresis numéricos el que más se ajusta a los resultados experimentales es el del muro reforzado con FRCM de algodón. Esto puede deberse al mejor ajuste del modelo numérico del espécimen de FRCM de algodón con los resultados experimentales (ver Tabla 7.1).

Curva bilineal: en la Figura 7.14 se muestran la comparación de las curvas bilineales obtenidas por los modelos numérico con las obtenidas del promedio de los ensayos experimentales, y los modelos analíticos. En esta se aprecia como la curva bilineal numérica

se ajusta efectivamente a las curvas bilineales experimental y analítica. Las curvas bilineales numéricas presentan resultados más conservadores de carga máxima, y de mayor rigidez que las curvas bilineales experimentales y analíticas. Sin embargo, las variaciones entre estas, están por debajo del 20% en todos los casos (ver Tabla 7.2), por lo que se puede considerar que se obtuvo una efectiva aproximación.

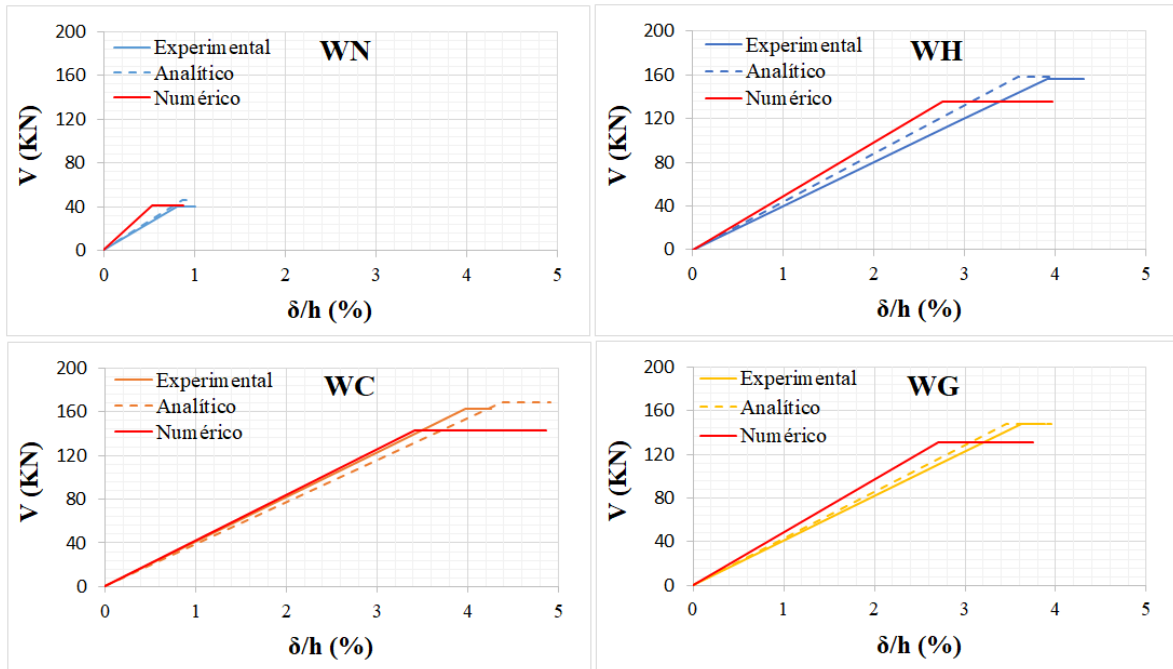


Figura 7.14. Comparación de curvas bilineales de modelos numéricos, experimental y analítico

Degradación de rigidez: la Figura 7.15a presenta el diagrama de degradación de rigidez, en esta los modelos numéricos muestran un degradación significativa entre el primer y segundo ciclo (solo en el caso de los muros reforzados con FRCM), y luego un aumento progresivo del coeficiente rigidez hasta alcanzar una distorsión de aproximadamente 0.4%.

Esto se debe a la inestabilidad del modelo para bajas distorsiones (menores de 0.4%), presentando asimetría de las fuerzas resultante máxima en cada dirección de carga. Por lo que se consideran descartable los valores de rigidez antes de alcanzar la distorsión de 0.4%.

Una vez se alcanzada esta distorsión de 0.4%, comienza una progresiva degradación de rigidez. En la Figura 7.15a se confirma como inicialmente los modelos numéricos tienen una mayor rigidez que la presentada por los muros experimentales. Sin embargo, a medida que aumentan las distorsiones, el coeficiente de rigidez se va aproximando a los coeficientes de

rigidez de los resultados experimentales. Esto demuestra la eficiencia del modelo a medida que la estructura experimenta mayor daño.

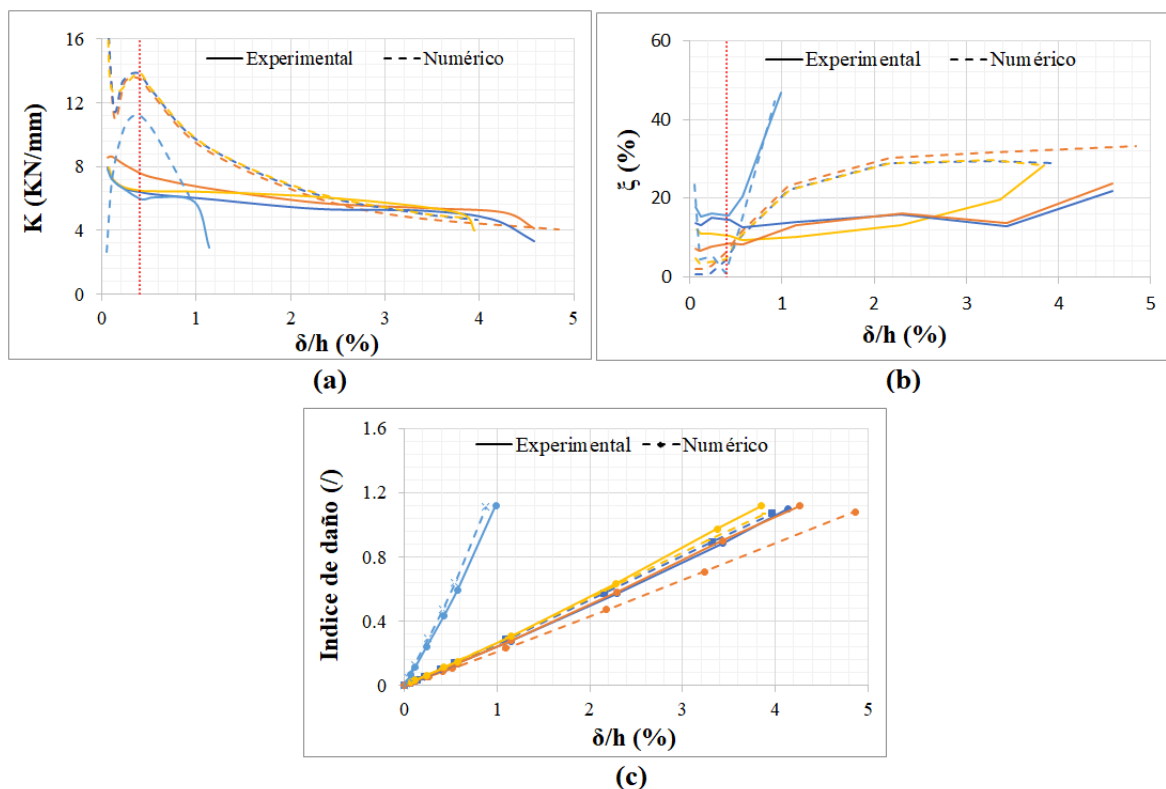


Figura 7.15. Comparación de propiedades de modelo numérico y experimental: (a) Degradación de rigidez, (b) Factor de amortiguamiento, (c) Índice de daño

Factor de amortiguamiento: para el caso de los modelos numéricos de los muros reforzados con FRCM, el factor de amortiguamiento presenta un aumento variable-progresivo hasta alcanzar una distorsión de aproximadamente 2.2% (ver Figura 7.15), a partir de esta distorsión este parece permanecer constante hasta llegar la distorsión de fallo. Sin embargo, en el caso de los muros sin reforzar el factor de amortiguamiento presenta un descenso significativo hasta alcanzar una distorsión de aproximadamente 0.4% (esto coincide con la inestabilidad del modelo antes de esta distorsión, explicado anteriormente), y a partir de esta se observa un aumento continuo-progresivo hasta alcanzar la distorsión de fallo.

Para el caso de los muros sin reforzar, el factor de amortiguamiento se aproxima significativamente con los resultados experimentales, lo cual coincide con la baja variación de la energía total disipada por el modelo con respecto a lo experimental (ver Tabla 7.2). Sin embargo, en el caso de los muros reforzados se observa un factor de amortiguamiento muy superior a los resultados experimentales, lo que confirma el modelo de disipa mayor energía

que los muros ensayados experimentalmente, debido a la incapacidad del modelo de reproducir exactitud las aperturas de fisuras reversibles que presentan los ensayos experimentales.

Índice de daño: En la Figura 7.15c se muestra la comparación de los índices de daños de los modelos numéricos con los índices de daños obtenidos de los ensayos experimentales. En ésta se muestra una significativa aproximación a los resultados experimentales, con excepción de los muros reforzados con FRCM de algodón, esto debido a la mayor distorsión alcanzada por modelo numérico (4.88%) en comparación con la experimental (4.27%). Pues tanto el modelo analítico como el numérico suponen una distorsión de fallo mayor a la experimental. Esta se asume como la distorsión de fallo si en los muros ensayados experimentalmente no hubiera fallado la conexión entre el FRCM y la mampostería (ver capítulo 5)

Los resultados presentados en este apartado demuestran como los modelos numérico de muros reforzados y sin reforzar con FRCM son capaces de reproducir con suficiente aproximación el comportamiento experimental y analítico presentados en los capítulos 5 y 6. A pesar de ello, estos modelos presentan problemas de inestabilidad para distorsiones menores de 0.4%, inicialmente presentan mayor rigidez que los resultados experimentales, y además presenta cierta incapacidad de reproducir las aperturas reversibles de fisuras, por lo que los modelos disiparon mayor energía que muros experimentales.

7.4. Conclusiones

A raíz de los ensayos experimentales y modelos analíticos de los especímenes de FRCM y de muros reforzados y sin reforzar con FRCM fue posible desarrollar modelos numéricos, y comparar sus resultados con los experimentales y analíticos. A partir de estos se llega a las siguientes conclusiones:

FRCM:

- El modelo uniaxial basado en el daño plástico del mortero fue efectivo reproducir el comportamiento de los FRCM de cáñamo, lino y sisal. Sin embargo, en el caso del FRCM de algodón fue necesario suponer una tensión de fisuración constante al llegar al 60% de degradación de la tensión de fisuración.
- En los casos de FRCM de sisal y algodón, fue necesario utilizar el coeficiente de reducción de tensión de fisuración utilizado en el modelo analítico (capítulo 6), para aproximar los resultados obtenidos a los resultados experimentales y analíticos.

- Los modelos numéricos de FRCM presentados en este capítulo fueron capaces de simular de manera aproximada el comportamiento analítico y experimental presentado en capítulos anteriores. Por lo que estos modelos representan una herramienta de cálculo efectiva para el análisis de FRCM de fibras vegetales donde la interacción entre malla y matriz sea lo suficientemente buena para impedir los fallos por deslizamiento o desprendimiento del mortero.

Muros reforzados y sin reforzar con FRCM:

- El modelo de los muros sin reforzar fue efectivo para predecir el cortante máximo (con resultados conservadores), la dispersión a carga máxima y la energía total disipada, con variaciones entre 2 y 14% con respecto a los resultados experimentales y analíticos. Sin embargo, presenta una rigidez inicial muy superior a la obtenida experimental y analíticamente.
- Los modelos de los muros reforzados con FRCM fueron efectivos para predecir el cortante máximo, distorsión a cortante máximo y la rigidez inicial con variaciones entre 0 y 20%. Sin embargo, presentaron valores de energía disipada mayores que los obtenidos experimentalmente. Esto debido a la incapacidad del modelo de reproducir las aperturas de fisuras reversibles que presentan los ensayos experimentales.
- En general los modelos numéricos presentan mayor rigidez inicial que los resultados experimentales, pero a medida que aumentan los daños se van aproximando a estos.
- Los modelos presentan inestabilidad para distorsiones menores de 0.4%, presentando asimetría en las fuerzas resultantes máximas de cada dirección de carga. Por lo que se consideran descartable los valores antes de alcanzar la distorsión de 0.4%.
- Los modelos numéricos de muros reforzados y sin reforzar con FRCM presentados en este capítulo representan una herramienta de cálculo útil para reproducir el comportamiento de muros con elevada compatibilidad entre las interfaces de FRCM-mampostería, y malla-mortero. Esto debido a que estos modelos no consideran los posibles fallos por deslizamientos de la malla, ni desprendimientos de mortero en las interacciones de FRCM-mampostería, y malla-mortero (presentados en los capítulos 4 y 5).

Capítulo VIII. Conclusiones generales y futuras líneas de investigación

8.1. Conclusiones generales

Se diseñaron mallas de fibras vegetales en base a la caracterización de hilos de distintos tipos fibras, para luego determinar su comportamiento dentro de una matriz cementicia de mortero. En base a estos resultados se eligieron dos tipos de FRCM de fibras vegetales para reforzar muros de mampostería, y someterlos a ensayos de cargas cíclica. Para luego finalizar verificando estos ensayos experimentales con modelos numéricos y analíticos tanto de los especímenes de FRCM, como de los muros reforzados y sin reforzar con FRCM.

La principal conclusión de la presente tesis es que es posible utilizar fibras vegetales para la producción de refuerzos de FRCM de propiedades técnicas comparables a los de fibras sintéticas y cuya aplicación en elementos de mampostería supone una mejora de la respuesta estructural frente a cargas sísmicas.

Las conclusiones particulares más importantes obtenidas de cada capítulo se resumen a continuación:

8.1.1. Mallas de fibras vegetales

- De las fibras vegetales estudiadas la que presentó mayor resistencia a tracción fue la de lino, seguida por el cáñamo, sisal y algodón.
- El revestimiento de resina aumenta la resistencia a la tracción y la rigidez en casi todos los hilos de fibras vegetales ensayados, sobre todo, en el caso del hilo de cáñamo cuya resistencia a la tracción y módulo de elasticidad aumentaron en un 84% y un 92%, respectivamente. Por lo tanto, es necesario aplicar un control preciso sobre

el procedimiento de recubrimiento para controlar el comportamiento mecánico deseado.

- El comportamiento mecánico de los mechones de las mallas se ve comprometido por la técnica de tejido a utilizar. Pues para el caso de los mechones tejidos, hay una pérdida significativa de las propiedades resistentes de los hilos, debido a las disposiciones cruzadas en la que se encuentra los hilos en forma de tejidos.

8.1.2. FRCM de fibras vegetales

- FRCM con malla revestida de epoxi muestra un mayor porcentaje de eficiencia de los hilos que los FRCM con malla revestidas con poliéster. Este hecho demuestra que la resina epoxi tiene una mejor compatibilidad con la matriz de mortero que la de poliéster.
- El FRCM de cáñamo fue el que alcanzó mayores niveles de tensión. Sin embargo, el FRCM de algodón mostró mayor capacidad de alargamiento y un patrón de multifisuras superior a los demás FRCM ensayados. Debido a esto, estos fueron los tipos de FRCM utilizados para reforzar los muros.
- Las técnicas de tejidos empleados mejoran la interacción malla-matriz pues en todos los casos alcanzan el 100% del rendimiento mecánico de los mechones. Sin embargo, debido a estas técnicas de tejido la eficiencia de los hilos se ve reducida.
- Las mejores propiedades mecánica del mortero Sika hizo que esta matriz fuera más efectiva para absorber las tensiones tangenciales transmitidas por las mallas en los ensayos de tracción y adherencia, alcanzando mayores niveles de cargas y mejor compatibilidad con todas las mallas utilizadas.
- El revestimiento de las mallas de fibras vegetales parece mejorar la adherencia con el mortero mostrando un comportamiento de multifisuras y alcanzando unos niveles de cargas superiores a los especímenes reforzados con basalto y carbono. Lo que sugiere la posibilidad de que los FRCM de fibras vegetales puedan alcanzar propiedades mecánicas comparables o superiores a los FRCM de fibras sintéticas

8.1.3. Muros reforzados con FRCM de fibras vegetales

- Los tipos de fallos presentados en los diferentes especímenes, indican una mayor distribución de las tensiones en los refuerzos en el caso de los muros reforzados con FRCM de fibras vegetales, y con ello la posibilidad de disipar mayor energía a través de estas fisuras. Sin embargo, los desprendimientos del refuerzo, pueden indicar un exceso en el volumen de fibra utilizado, y la necesidad de recurrir a método de anclaje, para mejorar la conexión entre FRCM y mampostería.
- Los resultados muestran un mayor incremento de la resistencia a cortante y de la capacidad de disipación de energía en los muros reforzados con fibras vegetales con respecto a los otros muros reforzados, pues la capacidad de alargamiento de las mallas de fibras vegetales (sobre todo la de algodón), les permitió alcanzar mayores niveles de carga y deformación.

- El refuerzo con FRCM de fibras vegetales logró aumentar capacidad de deformación de los muros en más de un 300%, lo cual les permitió disipar más energía que los demás muros.
- Las propiedades de degradación de rigidez, amortiguamiento, deformación residual, e índice de daño, fueron desarrolladas con mayor eficiencia en los muros reforzados con FRCM de fibras vegetales en comparación con otros especímenes.
- El mayor volumen de fibras utilizado en los casos de los FRCM de fibras vegetales permitió reducir la cantidad de mortero en cerca 0.5% a los FRCM de cáñamo y en cerca de 5% al de algodón, en comparación con los FRCM de fibra vidrio. Esto lleva a reducir el peso específico del FRCM y los efectos medioambientales causado por el uso de la matriz cementicia utilizada en este estudio.
- La normalización de los incrementos de resistencia a cortante, capacidad de deformación y energía disipada aportados por cada malla, indican un mayor aprovechamiento de la resistencia a tracción y un menor aprovechamiento de la capacidad de deformación de la malla en el caso los muros reforzados con FRCM de algodón. Esto indica la posibilidad de reducir el volumen de fibras, y con ello la resistencia a tracción de la malla, y así también la necesidad de mejorar la conexión con el muro para un mejor aprovechamiento de la capacidad de deformación de la malla.

8.1.4. Estudio analítico

- Los modelos analíticos ajustados propuestos para el análisis del FRCM a tracción han demostrado una mayor precisión en la predicción de la respuesta experimental que el modelo ACK. Sin embargo, estos no pudieron modelar el aumento progresivo de la tensión a lo largo de la etapa II.
- Los resultados de los modelos ajustados propuestos para los muros reforzados con FRCM, indica una considerable aproximación a los resultados experimentales, pues a partir de la teoría de la mezcla fue posible introducir los aportes de la matriz de refuerzo y de la capacidad de deformación de la malla. Sin embargo, debido a que los muros reforzados con FRCM de fibras vegetales presentaron fallos por desprendimiento del FRCM, queda en duda los valores experimentales de resistencia a cortante y deformación de fallo, si los muros hubieran alcanzado la rotura de la malla.

8.1.5. Modelo Numérico

- El modelo uniaxial basado en el daño plástico del mortero fue efectivo para reproducir el comportamiento de los FRCM de cáñamo, lino y sisal. Sin embargo, en el caso del algodón fue necesario suponer una tensión de fisuración constante al llegar al 60% de degradación de la tensión de fisuración.
- Los modelos numéricos del FRCM fueron capaces de simular de manera aproximada el comportamiento analítico y experimental presentado en capítulos anteriores. Por lo que estos modelos representan una herramienta de cálculo efectiva para el análisis de FRCM de fibras vegetales donde la interacción entre malla y matriz sea lo

suficientemente buena para impedir los fallos por deslizamiento o desprendimiento del mortero.

- Los modelos de los muros reforzados con FRCM fueron efectivos para predecir el cortante máximo, distorsión a cortante máximo y la rigidez inicial con variaciones entre 0 y 20%. Sin embargo, presentaron valores de energía disipada mayores que los obtenidos experimentalmente. Posiblemente debido a la incapacidad del modelo de reproducir las aperturas de fisuras reversibles que presentan los ensayos experimentales.
- Los modelos de muros sometidos a cargas cíclica presentan inestabilidad para distorsiones menores de 0.4%, presentando asimetría en las fuerzas resultantes máximas de cada dirección de carga. Por lo que se consideran descartable los valores antes de alcanzar la distorsión de 0.4%.
- Los modelos numéricos de muros reforzados y sin reforzar con FRCM presentados representan una herramienta de cálculo útil para reproducir el comportamiento de muros con elevada compatibilidad entre las interfaces de FRCM-mampostería, y malla-mortero. Esto debido a que estos modelos no consideran los posibles fallos por deslizamientos de la malla, ni desprendimientos de mortero en las interacciones de FRCM-mampostería, y malla-mortero (presentados en los capítulos 4 y 5).

8.2. Futuras líneas de investigación

A raíz de los resultados obtenidos en esta tesis doctoral y de las preguntas que quedan sin resolver, se plantean las siguientes futuras líneas de investigación:

- La primera cuestión que queda sin resolver en este estudio es la posibilidad de recurrir a otros métodos de revestimiento de la malla que sean más sostenibles con el medio ambiente, que les aporte menos rigidez a las fibras, y que evite la degradación de éstas dentro de la matriz cementicia. Todo esto sin aumentar de manera excesiva el coste del refuerzo, y sin afectar significativamente la buena interacción obtenida en este estudio entre la matriz y los tejidos.
- Otro de los incidentes que se presentaron durante esta tesis doctoral fue el proceso de fabricación de las mallas, pues fue totalmente artesanal, y debido al método de aplicación de resina (con un pincel) no se pudo asegurar la homogénea distribución de la resina en la malla. Debido a esto se propone desarrollar métodos más industrializados que permitan la elaboración de las mallas de fibras vegetales útiles para refuerzo de FRCM, y así también diseñar mallas de fibras vegetales con las geometrías y métodos de tejidos más óptimos para su aplicación en muros de mampostería sometidos a cargas cíclicas.

- Atendiendo a las buenas prestaciones mecánicas que presentaron los especímenes de FRCM de fibras vegetales sometidos a tracción, se plantea la posibilidad de aplicar estos tipos de refuerzo en otros tipos de estructuras (vigas, columnas, forjados, arcos, etc.), ya sean de mampostería o de hormigón.
- Debido a la gran variedad de fibras vegetales que existe en el mundo y a la falta de disponibilidad en algunas zonas debido a la no producción de éstas, sería interesante estudiar e identificar otros tipos de fibras vegetales que pudieran ser útiles para el refuerzo de FRCM, y que sean producidas en zonas sísmicas que pudiesen necesitar este tipo de refuerzo de bajo coste para reforzar sus estructuras.
- Atendiendo a la posibilidad de utilizar un mayor volumen de fibras vegetales debido a su bajo coste y baja densidad, se ve interesante el estudiar la posibilidad de fabricar paneles de hormigón reforzados con tejidos de fibras vegetales, con prestaciones mecánicas viables para su aplicación. Pues esto supondría la fabricación de paneles de hormigón más ligeros, más económicos y más sostenibles con el medio ambiente, en comparación con los paneles de hormigón reforzado con acero.
- Debido a que los modelos numéricos y analíticos, no fueron capaces de reproducir los fallos por deslizamiento de la malla y desprendimiento del mortero (en las interfaces malla-matriz y matriz-mampostería), sería de interés desarrollar modelos numéricos que sean capaces de reproducir estos tipos de fallos.

Capítulo IX. Referencias

- [1] C. Díaz Gómez, “Las técnicas de rehabilitación: reforzar las estructuras,” 2006.
- [2] R. L. B. Días, “Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada.,” pp. 185–228, 2003.
- [3] A. V. Jaimes, “Modelos simples para el análisis de muros de obra de fábrica cargados en su plano,” 2009.
- [4] O. R. H. Gallegos, *Edificaciones de Mampostería Para La Vivienda*, vol. 2nd ed., 2003.
- [5] R. Meli, “Comportamiento sísmico de muros de mampostería, 2ª edición,” México, 1979.
- [6] S. Hračov, S. Pospíšil, A. Garofano, and S. Urushadze, “In-plane cyclic behaviour of unfired clay and earth brick walls in both unstrengthened and strengthened conditions,” *Mater. Struct.*, pp. 3293–3308, 2015.
- [7] M. Irimies and C. Bia, “Cyclic loading behavior of a perforated unreinforced,” pp. 1–5.
- [8] Y. Zhuge, D. Thambiratnam, Fellow, ASCE, and J. Corderof, “Nonlinear dynamic analysis of unreinforced masonry,” vol. 124, no. Dhanasekar 1984, pp. 270–277, 1998.
- [9] D. P. Abrams, “Strength and behavior of unreinforced masonry elements.” Tenth World Conference, 1992.
- [10] E. Bernat-Maso, “Comportamiento estructural de muros de obra de fábrica reforzados con TRM,” in *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*, no. 9, M. A. Perez, Ed. 2013, pp. 137–164.
- [11] B. Loads, “Experimental Analysis of Repaired Masonry Elements with Flax-FRCM and PBO-FRCM Composites Subjected to Axial Bending Loads,” pp. 491–503, 2015.
- [12] O. A. Cevallos, R. S. Olivito, R. Codispoti, and L. Ombres, “Flax and polyparaphenylene benzobisoxazole cementitious composites for the strengthening of masonry elements subjected to eccentric loading,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 71, no. April 2016, pp. 82–95, 2015.
- [13] S. Babaeidarabad, D. Ph, F. De Caso, A. Nanni, and F. Asce, “Out-of-Plane Behavior of URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite,” *Asce*, vol. 549, no. 2013, pp. 1–11, 2014.
- [14] A. Balsamo, M. Di Ludovico, A. Prota, and G. Manfredi, “Masonry walls strengthened with

- innovative composites,” *Am. Concr. Institute, ACI Spec. Publ.*, vol. 2, pp. 769–786, 2011.
- [15] F. Parisi, I. Iovinella, A. Balsamo, N. Augenti, and A. Prota, “In-plane behaviour of tuff masonry strengthened with inorganic matrix-grid composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 1657–1666, 2013.
- [16] Y. Yardim and O. Lalaj, “Shear strengthening of unreinforced masonry wall with different fiber reinforced mortar jacketing,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 149–154, 2016.
- [17] L. Koutas, S. N. Bousias, and T. C. Triantafillou, “Seismic Strengthening of Masonry-Infilled RC Frames with TRM: Experimental Study,” *J. Compos. Constr.*, vol. 19, no. 2, p. 4014048, 2015.
- [18] C. Menna, D. Asprone, M. Durante, A. Zinno, A. Balsamo, and A. Prota, “Structural behaviour of masonry panels strengthened with an innovative hemp fibre composite grid,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 100, pp. 111–121, 2015.
- [19] C. Rosamaria, “Mechanical Performance of Natural Fiber-Reinforced Composites for the Strengthening of Ancient Masonry,” University of Calabria, 2013.
- [20] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest, “Natural fibres: Can they replace glass in fibre reinforced plastics?,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1259–1264, 2003.
- [21] R. S. Olivito, O. A. Cevallos, and A. Carrozzini, “Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures,” *Mater. Des.*, vol. 57, pp. 258–268, 2014.
- [22] L. Pil, F. Bensadoun, J. Pariset, and I. Verpoest, “Why are designers fascinated by flax and hemp fibre composites?,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 83, pp. 1–13, 2015.
- [23] L. Huang, B. Yan, L. Yan, Q. Xu, H. Tan, and B. Kasal, “Reinforced concrete beams strengthened with externally bonded natural flax FRP plates,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 91, pp. 569–578, 2016.
- [24] J. Flynn, A. Amiri, and C. Ulven, “Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance,” *Mater. Des.*, vol. 102, pp. 21–29, 2016.
- [25] P. Pandey, D. Bajwa, C. Ulven, and S. Bajwa, “Influence of Hybridizing Flax and Hemp-Agave Fibers with Glass Fiber as Reinforcement in a Polyurethane Composite,” *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 5, p. 390, 2016.
- [26] D. Snoeck, P. A. Smetryns, and N. De Belie, “Improved multiple cracking and autogenous healing in cementitious materials by means of chemically-treated natural fibres,” *Biosyst. Eng.*, vol. 139, no. 1998, pp. 87–99, 2015.
- [27] O. A. Cevallos and R. S. Olivito, “Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 69, pp. 256–266, 2014.
- [28] R. S. Olivito, R. Codispoti, and O. A. Cevallos, “Bond behavior of Flax-FRCM and PBO-FRCM composites applied on clay bricks: Experimental and Theoretical study,” *Compos. Struct.*, vol. 146, pp. 221–231, 2016.
- [29] G. Caprino, L. Carrino, M. Durante, A. Langella, and V. Lopresto, “Low impact behaviour of hemp fibre reinforced epoxy composites,” *Compos. Struct.*, vol. 133, pp. 892–901, 2015.
- [30] L. Boccarusso, L. Carrino, M. Durante, A. Formisano, A. Langella, and F. Memola Capece Minutolo, “Hemp fabric/epoxy composites manufactured by infusion process: Improvement of fire properties promoted by ammonium polyphosphate,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 89, pp. 117–126, 2016.

- [31] M. Ardanuy, J. Claramunt, and R. D. Toledo Filho, "Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 115–128, 2015.
- [32] H. Ahmad and M. Fan, "Interfacial properties and structural performance of resin-coated natural fibre rebars within cementitious matrices," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 87, pp. 44–52, 2018.
- [33] F. Micelli and M. A. Aiello, "Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments," *Compos. Part B Eng.*, 2016.
- [34] J. Donnini and V. Corinaldesi, "Mechanical characterization of different FRCM systems for structural reinforcement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 145, pp. 565–575, 2017.
- [35] T. D'Antino and C. Papanicolaou, "Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 78–91, 2017.
- [36] S. Babaeidarabad, F. De Caso, D. Ph, A. Nanni, D. Ph, and F. Asce, "Italian supplier expands its markets," *Foundry Trade J.*, vol. 178, no. 3616, p. 242, 2004.
- [37] P. F. Silva, P. Yu, and A. Nanni, "Monte Carlo simulation of shear capacity of URM walls retrofitted by polyurea reinforced GFRP grids," *J. Compos. Constr. ASCE*, vol. 12, no. 2, pp. 405–415, 2008.
- [38] A. Mebarki, "Metodo Semi-Empírico Para Estimar La Resistencia," vol. 127, no. 80, pp. 113–127, 2009.
- [39] T. D'Antino, F. G. Carozzi, P. Colombi, and C. Poggi, "Out-of-plane maximum resisting bending moment of masonry walls strengthened with FRCM composites," *Compos. Struct.*, vol. 202, no. April, pp. 881–896, 2018.
- [40] ACI committee 549, *Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures*. 2013.
- [41] N. Ismail, T. El-Maaddawy, N. Khattak, and A. Najmal, "In-Plane Shear Strength Improvement of Hollow Concrete Masonry Panels Using a Fabric-Reinforced Cementitious Matrix," *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 2, p. 4018004, 2018.
- [42] A. Cascardi, F. Micelli, and M. A. Aiello, "Analytical model based on artificial neural network for masonry shear walls strengthened with frm systems," *Compos. Part B Eng.*, vol. 95, pp. 252–263, 2016.
- [43] S. Zhang, D. Yang, Y. Sheng, S. W. Garrity, and L. Xu, "Numerical modelling of FRP-reinforced masonry walls under in-plane seismic loading," *Constr. Build. Mater.*, vol. 134, pp. 649–663, 2017.
- [44] L. Karapitta, H. Mouzakis, and P. Carydis, "Explicit finite-element analysis for the in-plane cyclic behavior of unreinforced masonry structures," no. July 2010, pp. 175–193, 2011.
- [45] A. Rekik and F. Lebon, "Advances in Engineering Software Homogenization methods for interface modeling in damaged masonry," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 46, no. 1, pp. 35–42, 2012.
- [46] S. Burnett, M. Gilbert, T. Molyneaux, G. Beattie, and B. Hobbs, "The performance of unreinforced masonry walls subjected to low-velocity impacts : Finite element analysis," vol. 34, pp. 1433–1450, 2007.
- [47] A. J. Aref and K. M. Dolatshahi, "A three-dimensional cyclic meso-scale numerical procedure for simulation of unreinforced masonry structures," *Comput. Struct.*, vol. 120, pp. 9–23, 2013.
- [48] J. Donnini, G. Lancioni, and V. Corinaldesi, "Failure modes in FRCM systems with dry and

- pre-impregnated carbon yarns : Experiments and modeling,” *Compos. Part B*, vol. 140, no. December 2017, pp. 57–67, 2018.
- [49] E. Grande and G. Milani, “Interface modeling approach for the study of the bond behavior of FRCM strengthening systems,” *Compos. Part B*, vol. 141, no. December 2017, pp. 221–233, 2018.
- [50] E. Grande, M. Imbimbo, and E. Sacco, “Numerical investigation on the bond behavior of FRCM strengthening systems,” *Compos. Part B*, vol. 145, no. March, pp. 240–251, 2018.
- [51] F. G. Carozzi, G. Milani, and C. Poggi, “Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures,” *Compos. Struct.*, vol. 107, pp. 711–725, 2014.
- [52] C. Carloni, T. D. Antino, L. H. Sneed, and C. Pellegrino, “Three-Dimensional Numerical Modeling of Single-Lap Direct Shear Tests of FRCM-Concrete Joints Using a Cohesive Damaged Contact Approach,” vol. 22, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [53] E. Bertolesi, G. Milani, and C. Poggi, “Simple holonomic homogenization model for the non-linear static analysis of in-plane loaded masonry walls strengthened with FRCM composites,” *Compos. Struct.*, vol. 158, pp. 291–307, 2016.
- [54] Simulia, “Abaqus 6.11. User’s Manual.” 2011.
- [55] EN ISO 13934-1/2, *Textiles - Tensile properties of fabrics - Part 1: Determination of maximum force and elongation at maximum force using the strip method*, no. EN ISO 13934-1/2. 2013.
- [56] C. Escrig, L. Gil, E. Bernat-Maso, and F. Puigvert, “Experimental and analytical study of reinforced concrete beams shear strengthened with different types of textile-reinforced mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 83, pp. 248–260, 2015.
- [57] EN 1504-3, “EN 1504-3 Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity - Part 3: Structural and non-structural repair,” <http://www.aenor.es/>, 2005.
- [58] UNE-EN 1015-11, “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería - Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido,” 2000, p. 14.
- [59] J. Hartig, F. Jesse, K. Schicktzanz, and U. Häußler-Combe, “Influence of experimental setups on the apparent uniaxial tensile load-bearing capacity of Textile Reinforced Concrete specimens,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 45, no. 3, pp. 433–446, 2012.
- [60] D. Arboleda, “Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation : Characterization Methods,” *PhD Thesis*, pp. 1–131, 2014.
- [61] S. De Santis, F. G. Carozzi, G. de Felice, and C. Poggi, “Test methods for Textile Reinforced Mortar systems,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 127, pp. 121–132, 2017.
- [62] F. G. Carozzi and C. Poggi, “Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 70, 2015.
- [63] D. Arboleda, F. G. Carozzi, A. Nanni, and C. Poggi, “Testing Procedures for the Uniaxial Tensile Characterization of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composites,” *J. Compos. Constr.*, vol. 20, no. 3, p. 4015063, 2016.
- [64] ICC Evaluation Service Inc., “Proposed Revisions to the Acceptance Criteria for Masonry and

Concrete Strengthening Using Fiber-reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems, Subject AC434-0213-R1 (ME/BG),” 2012.

- [65] J. Aveston and A. Kelly, “Theory of multiple fracture of fibrous composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 352–362, Mar. 1973.
- [66] P. Larrinaga, C. Chastre, H. C. Biscaia, and J. T. San-Jose, “Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress,” *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 66–74, 2014.
- [67] E. Bernat, L. Gil, P. Roca, and C. Escrig, “Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 35–47, 2013.
- [68] Comité técnico AEN/CTN 80, *Cales para construcción-parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad*. 2016.
- [69] E. Bernat-Maso, “Analysis of unreinforced and TRM-strengthened brick masonry walls subjected to eccentric axial load,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [70] E. Bernat-Maso, C. Escrig, C. A. Aranha, and L. Gil, “Experimental assessment of Textile Reinforced Sprayed Mortar strengthening system for brickwork wallties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 50, pp. 226–236, 2014.
- [71] ASTM C1072 - 13, *Standard Test Methods for Measurement of Masonry Flexural Bond Strength*. 2013.
- [72] UNE-EN 1052-3:2003, *Methods of test for masonry - Part 3: Determination of initial shear strength*. 2003.
- [73] A. American and N. Standard, “Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings 1,” *Assembly*, no. November 2002, pp. 1–9.
- [74] N. Ismail and J. M. Ingham, “In-plane and out-of-plane testing of unreinforced masonry walls strengthened using polymer textile reinforced mortar,” *Eng. Struct.*, vol. 118, pp. 167–177, 2016.
- [75] Q. Su, G. Cai, and H. Cai, “Seismic behaviour of full-scale hollow bricks-infilled RC frames under cyclic loads,” *Bull. Earthq. Eng.*, 2016.
- [76] L. Miranda, J. Milosevic, and R. Bento, “Cyclic behaviour of stone masonry walls strengthened by grout injection,” *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 1, p. 47, 2017.
- [77] Y.-H. Kwok and A. S. Ang, “Seismic Damage Analysis and Design of Unreinforced Masonry Buildings, Structural research series no. 536,” no. 536, p. 104, 1987.
- [78] P. Larrinaga, C. Chastre, J. T. San-José, and L. Garmendia, “Non-linear analytical model of composites based on basalt textile reinforced mortar under uniaxial tension,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 55, pp. 518–527, 2013.
- [79] BS EN 1992-1-1, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings,” *Br. Stand. Inst.*, vol. 1, no. 2004, p. 230, 2004.
- [80] J. C. A. P. Alvaro Garcia Meseguer, Francisco Moran Cabré, *Jimenez Montoya - Hormigon Armado*, 15th ed. Barcelona, 2011.
- [81] E. Bertolesi, F. G. Carozzi, G. Milani, and C. Poggi, “Numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix composites (FRCM) in tension,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 531–548, 2014.

- [82] B. Alfarah, F. López-Almansa, and S. Oller, “New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures,” *Eng. Struct.*, vol. 132, pp. 70–86, 2017.
- [83] N. L. Jorge, “Análisis de la aplicación del método de los elementos finitos al modelado de elementos de hormigón armado,” 2008.
- [84] Y. Sümer and M. Aktaş, “Defining parameters for concrete damage plasticity model,” vol. 1, no. 3, pp. 149–155, 2015.
- [85] EHE-08, “Normativa de hormigón estructural en España,” vol. 1, pp. 1689–1699, 2008.

Anexo A. Datos experimentales de caracterización de hilos y mechones, y especímenes de FRCM

A.1. Introducción

Este anexo es presentado con el objetivo de describir de una manera más extensa los métodos utilizados para la caracterización de los hilos de fibras vegetales, mechones tejido, mechones de fibras sintética, y especímenes de FRCM. Y así también todos los resultados obtenidos de los ensayos.

En este también se incluye una descripción más detallada sobre todos los materiales y equipos utilizados durante la caracterización de los hilos, mechones y especímenes de FRCM.

A.2. Materiales

A.2.1. Hilos de fibras vegetales

Para lograr los objetivos planteados en esta tesis fue necesario adquirir diferentes tipos de hilos de fibras vegetales (Figura A.1), para su caracterización, y posterior uso en especímenes de FRCM, y para el refuerzo de muros de mampostería.

Se adquirieron hilos de 4 tipos de fibras diferente, cuyas propiedades de cada uno se describen a continuación.



Figura A.1. Hilos de fibras vegetales

Hilos de Cáñamo

Se utilizaron 3 tipos de hilos de cáñamo, fabricados por la empresa Rombull, una empresa dedicada a la fabricación de redes, cordelería y mallas, ubicada en Alicante, España. Estos eran hilos pulidos usados comúnmente en industria, textil, agricultura, jardinería y paquetería.

Los datos suministrados por el fabricante se muestran en la Tabla A.1

Tabla A.1. Propiedades de hilos de cáñamo

Propiedades	Cáñamo		
	H ₁	H ₂	H ₃
Nomenclatura			
Espesor (mm)	0.5	1.3	3.5
Longitud de bobina (m)	180	90	48
Rotura (kg)	8.5	8-10	55
Peso (g)	100	50	250
Estructura	Cableado pulido		

Algunos de estos datos suministrados por el fabricante difieren con los obtenidos experimentalmente en este estudio (capítulo 3).

Hilos de Lino

De este tipo de fibra solo se utilizó un tipo de hilo, este fue obtenido a través de una tienda de collares Fills M. Sala. Es una bobina de 100 metros, el hilo es cableado de 3 cabos, de 0.5 mm de espesor, utilizado comúnmente para la fabricación de collares.

Hilos de Sisal

Se utilizaron 2 tipos de hilo de la empresa standers, otra empresa dedicada a la fabricación de redes, cordelería y mallas. Las propiedades suministradas por el fabricante se observan en la Tabla A.2

Tabla A.2. Propiedades de hilos de sisal

Propiedades	Sisal	
Nomenclatura	S ₁	S ₂
Espesor (mm)	-	2.5
Longitud de hilo/ bobina (m)	15	45
Peso (g)	2	-
Estructura	Cableado	Trenzado

Hilos de Algodón

Se utilizaron 2 tipos de hilos de la empresa Rombull mencionada anteriormente. Las propiedades suministradas por el fabricante se muestran en la tabla Tabla A.3.

Tabla A.3. Propiedades de hilos de Algodón

Propiedades	Algodón	
Nomenclatura	C ₁	C ₂
Espesor (mm)	1.5	3
Longitud de hilo/ bobina (m)	66	25
Carga de rotura (kg)	-	33
Estructura	Trenzado	Trenzado

A.2.2. Mechones de mallas de fibras Sintéticas

Con el objetivo de comparar el comportamiento de las fibras vegetales con las de fibras sintética se utilizaron mallas comerciales de fibras sintética, cuya características y propiedades se describen a continuación.

Malla de Basalto (Fidbasalt Grid 300 C95)

Fidbasalt Grid 300 C95, es un tejido bidireccional formado por mechones de fibras de basalto producidas a partir de la fusión y posterior hilatura de rocas volcánicas. Los mechones

están fijados mediante el termo-soldado de una malla auxiliar de poliéster que previene su deshilachado y da consistencia al tejido (Figura A. 2). Presentan un ancho de 5mm y están separados 10 mm entre ellos.

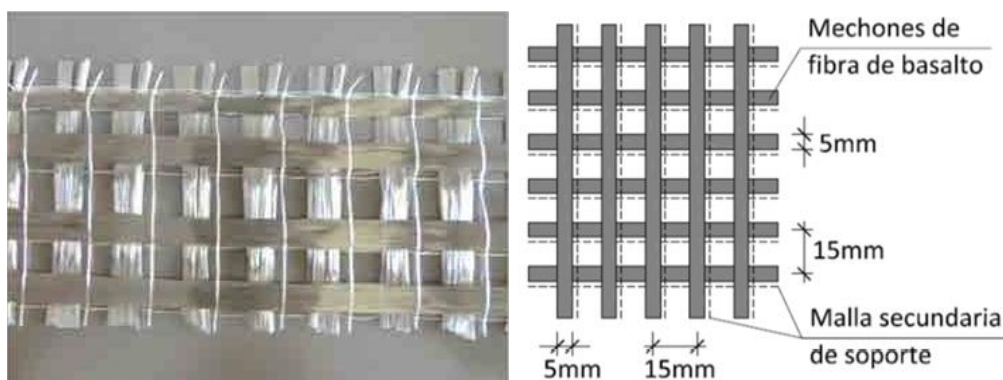


Figura A. 2. Malla Fidbasalt Grid 300 C95

Fidbasalt Grid 300 C95 es fabricado por la empresa Fidia S.R.L. y viene distribuido en bobinas de diferentes dimensiones. Las características técnicas según fabricante se resumen en la Tabla A.4.

Tabla A.4. Propiedades de la malla Fidbasalt Grid 300 C95

Parámetro	Valor
Fibras	
Densidad (g/cm^3)	2,8
Resistencia a tracción ($f_{\text{fib},u}$) (MPa)	3080
Módulo de elasticidad (E_{fib}) (GPa)	95
Deformación última ($\epsilon_{\text{fib},u}$) (%)	3,15
Mechón	
Densidad de masa lineal (Tex)	1200
Ancho mechón (w_m) (mm)	5
Malla	
Distribución Bidireccional	
Nº de mechones (mechón/cm)	1,25
Peso (g/m^2)	300(*)
Espesor equivalente (t_{tex}) (mm)	0,053
Resistencia a tracción ($f_{\text{tex},u}$) (MPa)	1735
Módulo de elasticidad (E_{tex}) (GPa)	90
Deformación última ($\epsilon_{\text{tex},u}$) (%)	1,93

(*) Incluye el peso de la malla auxiliar de polímero termoestable.

Malla de carbono (X Mesh C10)

El X Mesh C10 es un tejido bidireccional formado por mechones de fibra de carbono termosoldados a una red auxiliar de poliéster (Figura A.3). Estos tienen un ancho de 5 mm y están separados entre sí por una distancia de 5 mm.

X Mesh C10 es fabricado por la empresa Ruredil S.p.A. y viene distribuido en bobinas de 1000 mm de anchura y 15 m de longitud. Las características técnicas según fabricante se resumen en la Tabla A.5.

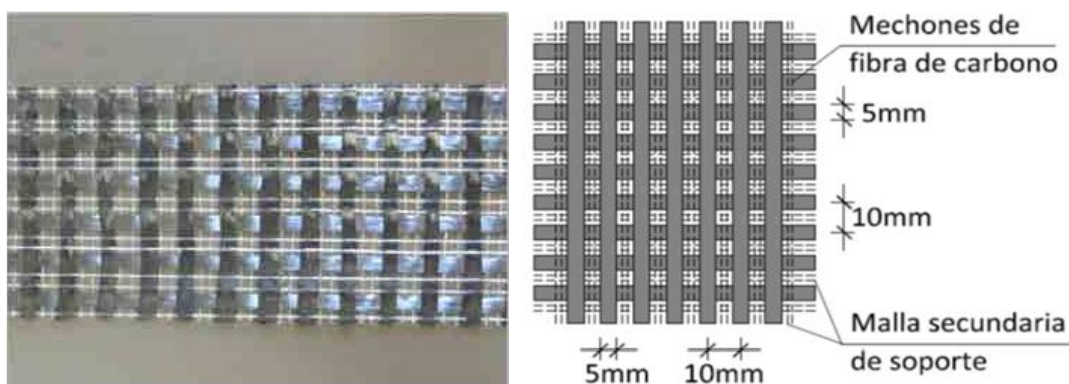


Figura A.3. Malla X Mesh C10

Tabla A.5. Propiedades de X Mesh C10

Parámetro	Valor
Fibras	
Densidad (g/cm ³)	1,82
Resistencia a tracción (MPa)	4800
Módulo de elasticidad (GPa)	240
Deformación última (%)	1,8
Mechón	
Ancho mechón (mm)	5
Resistencia a tracción (kp/cm)	≥160
Malla	
Distribución Bidireccional	
Separación entre mechones (mm)	5
Peso (g/m ²)	168
Espesor equivalente (mm)	0,047

Malla de fibra de vidrio (Mapegrid G220)

El Mapegrid G220, designado como G, es un tejido bidireccional formado por mechones de fibra de vidrio resistente a los álcalis recubiertos por una capa polimérica (Tabla A.6). Dependiendo de la dirección, los mechones tienen una anchura y separación diferentes, aunque la cuantía de fibras se mantiene invariante.

Este tipo de tejido ha sido diseñado como refuerzo externo de estructuras de mampostería, ofreciendo una mayor ductilidad y un reparto más uniforme de las solicitaciones en los especímenes. Presenta una óptima resistencia a tracción, así como una inalterabilidad a las agresiones químicas y a los agentes atmosféricos.

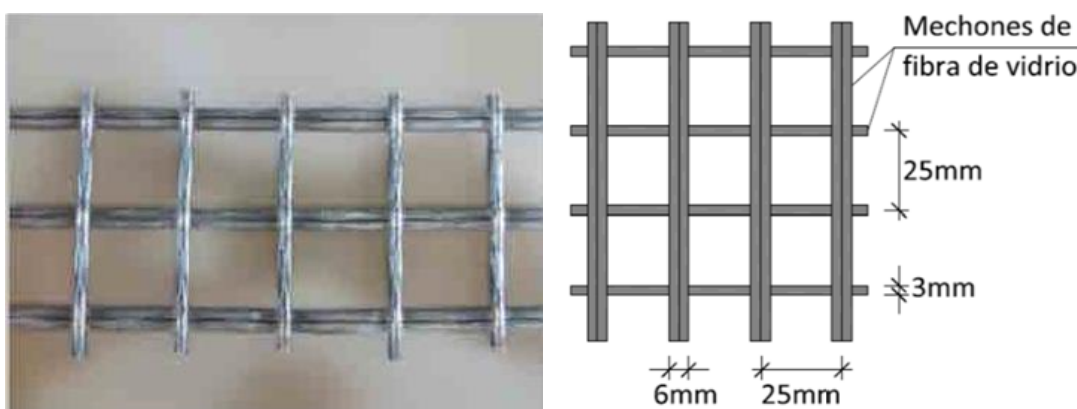


Figura A.4. Malla Mapegrid G220

Tabla A.6. Propiedades de Mapegrid G220

Parámetro	Valor
Fibras	
Resistencia a tracción (MPa)	2600
Mechón	
Ancho mechón (mm)	6 / 3
Malla	
Distribución	Bidireccional
Separación entre mechones (mm)	19 / 22
Peso (g/m ²)	225
Espesor equivalente (mm)	0,042
Resistencia a tracción (KN/m)	45

Mapegrid G220 es fabricado por la empresa Mapei S.p.A. y viene distribuido en bobinas de 900mm de anchura y 45,7m de longitud. Las características técnicas según fabricante se resumen en la Tabla A.6.

Esta malla también fue utilizada como malla de contraste en el reforzamiento de los muros sometidos a carga cíclica (capítulo 5).

A.2.3 Resinas

Con la finalidad de evitar la degradación de las fibras, mejorar las propiedades mecánicas de las fibras, y mejorar la adherencia malla mortero, se recubrieron los hilos y mallas con resina. En este estudio se utilizaron 2 tipos de resina, cuyas propiedades se presentan a continuación:

Epoxi

Se utilizó la resina epoxi MasterBrace P 3500, una resina de imprimación para sistemas compuestos de refuerzo estructural a base de fibra de carbono. Esta presenta una excelente adherencia y excelente penetración debido a su baja viscosidad.

MasterBrace P 3500 se presenta en proporciones adecuadas para realizar la mezcla directamente. Para mezclar es necesario mezclar con un agitador durante 3 minutos como mínimo o hasta obtener una masa homogénea sin grumos. Las propiedades de esta resina se presentan en la Tabla A. 7.

Tabla A. 7. Propiedades mecánicas de resina MasterBrace P 3500

Características	Métodos de ensayo	Unidades	Valores
Densidad (20°C):	UNE-EN ISO 2811-1	g/cm ³	aprox. 1,05
Rotura a tracción:	DIN 53504	MPa	aprox. 22,9 ± 4
Deformación en rotura:			aprox. 18,2 ± 7
Rotura a flexión:	UNE-EN ISO 178:2003/	MPa	no se rompe
Módulo a flexión:			aprox. 233,1
Rotura a compresión:	Pr EN 13412:2005	MPa	no se rompe
Módulo a compresión:	ASTM D695		aprox. 875 ± 1
Adherencia:	UNE-EN ISO 4624:2003	MPa	7 ± 2 (rotura por hormigón)

Poliéster

En el caso del poliéster se utilizó un poliéster estándar SILMAR SIL66BQ, utilizada para imprimación, suministrada por la tienda local Sagrsta. Para su aplicación se mezcla con una 2% de catalizador MEKP (Peroxido Metil Etil Cetona), y se agita hasta completar la homogenización. Las propiedades de esta resina se muestran en la Tabla A.8.

Tabla A.8. Propiedades mecánicas de resina SILMAR SIL66BQ

Propiedades	Método de Ensayo ASTM	Unidades	Valores
Resistencia a flexión	D-790	MPa	138,6
Módulo de flexión	D-790	MPa	4095
Resistencia tensión	D-638	MPa	69.6
Módulo de tensión	D-638	MPa	4206
Elongación	D-638	%	1.9
Temperatura de distorsión	D-648	°C	68.9
Dureza	D-2583	-	42-44

Con la finalidad de reducir el aporte de rigidez del poliéster a los hilos y reducir la viscosidad del poliéster estándar, se mezcló el poliéster estándar con el poliéster Cronolita 3015 suministrado por la empresa Platiform. Este es un poliéster no saturado, flexible de reactividad baja y viscosidad media, utilizado como flexibilizante de resinas. La propiedades de este se muestran en la Tabla A. 9.

Tabla A. 9. Propiedades mecánicas de resina Cronolita 3015

Propiedades	Método de Ensayo	Unidades	Valores
Peso específico	ISO 527	g/cm ³	1.2
Resistencia a tracción	ISO 527	MPa	15
Elongación a la rotura	ISO 527	%	50
Módulo de flexión	ISO 178	MPa	220
Temperatura de deformación bajo carga	ISO 75 A	°C	20

A.2.4. Morteros

Para la fabricación de los especímenes de FRCM se utilizaron 2 tipos de mortero, cuya descripción se presenta a continuación:

Mortero Sika

Se utilizó el mortero Sika MonoTop-612, un mortero de reparación estructural de un componente, reforzado con fibras y humo de sílice que cumple con los requerimientos de la Clase R3 de la UNE-EN 1504-3.

Este mortero es comúnmente utilizado para:

- Regeneración del hormigón en capa gruesa, tanto en superficies verticales, como techos.
- Regularización de superficies de hormigón o mortero de cemento, previamente a la aplicación de una pintura.
- Reparación de elementos de hormigón, rejuntado de elementos prefabricados.
- Para trabajos de reparación de hormigón, reparación de desconchones y daños del hormigón en edificios, puentes, infraestructuras y superestructuras.
- Para trabajos de refuerzo estructural del hormigón, incremento de la capacidad portante de las estructuras de hormigón mediante la adición de mortero.
- Para el incremento del recubrimiento con mortero adicional y sustitución del hormigón contaminado por carbonatación.

Este mortero también presenta las siguientes características y ventaja:

- Solo necesita adición de agua,
- Es fácil de aplicar
- Permite obtener la consistencia deseada sin más que modificar ligeramente la cantidad de agua, fácil aplicación.
- Elevadas resistencias mecánicas.
- Se adhiere perfectamente sin imprimación sobre la mayoría de los materiales de construcción (hormigón, piedra, ladrillo, etc.).
- Proyectable mecánicamente por vía húmeda.
- Presenta un acabado con aspecto listo para pintar.
- No es corrosivo, ni tóxico.
- Buena resistencia al fuego.

Las propiedades mecánicas de este mortero se presentan en la Tabla A.10.

Tabla A.10. Propiedades mecánicas de mortero Sika

Composición química	Mortero de cemento preparado, mejorado con resinas sintéticas, humo de sílice y reforzado con fibras de poliamida.
Densidad del mortero fresco:	2,1 kg/l (a + 20°C).
Granulometría:	0-2 mm.
Espesor de capa:	mín. 5 mm / máx. 30 mm
Resistencia a compresión (EN 12190):	40,3 MPa
Resistencia a flexión (EN 196-1):	8,3 MPa
Módulo de elasticidad E (EN 13412):	25,2 GPa
Adherencia (EN 1542):	1.9 MPa
Relación agua/polvo	14.5 %

Mortero Nivoplan

Con el objetivo de comparar dos matrices diferentes se utilizó también el mortero Nivoplan suministrado por la empresa Mapei. Este es un mortero para nivelación de paredes y techos, en interiores y exteriores.

Nivoplan es un polvo, gris o blanco, compuesto de cemento, áridos seleccionados y resinas sintéticas especiales, que mezclado con agua forma una pasta de fácil aplicación en vertical, con llana o con máquina de proyectar.

Este mortero está particularmente indicado para trabajos de revoco y enlucido de superficies, en paredes y techos, interiores y exteriores, en capas de espesor variable de 2 a 30 mm, haciéndolas idóneas para la colocación de cerámica o el acabado con pintura.

Algunos ejemplos de aplicación son:

- Nivelación de paredes, antes de la colocación de baldosas cerámicas.
- Reparación de viejos revocos deteriorados.
- Regularización de superficies de mortero y de hormigón armado, en piscinas y fachadas, antes de la colocación de revestimientos cerámicos o de la aplicación de membranas impermeabilizantes.
- Nivelación de paredes de hormigón celular y ladrillo.

Las propiedades mecánicas de este mortero se muestran en la Tabla A. 11.

Tabla A. 11. Propiedades mecánicas de mortero Nivoplan

Densidad aparente:	1400 kg/m ³
Densidad de la mezcla:	1830 kg/m ³
Residuo sólido:	100%
Temperatura de aplicación	5 °C a 30 °C
Espesor posible en una capa :	de 2 a 30 mm
Resistencia a compresión (EN 1015-11):	6 N/mm ² (MPa)
Resistencia a flexión:	3.5 N/ mm ² (MPa)
Adherencia sobre el hormigón (EN 1015-12):	≥1 Mpa
Relación agua/polvo:	20%

A.3. Caracterización de Hilos y mechones

A.3.1. Cuantificación de resina aplicada

En el caso de los hilos recubiertos con resina, fue necesario determinar la cantidad de resina aplicada en cada caso, para así estimar y establecer la cantidad de resina necesaria para recubrir las mallas de fibras vegetales.

Para ello se recubrieron 5 especímenes de hilos de cada tipo en un molde de madera en forma de marco con clavos en sus extremos. Un vez recubiertos los hilos, estos hilos con una longitud de 50 cm eran pesados en una báscula de precisión. Para así de esta manera determinar la densidad lineal de los hilos recubiertos, y a través de la diferencia de esta con las densidades lineales del hilo sin recubrir, fue posible determinar la cantidad de resina aplicada por longitud de hilo. La Tabla A.12 muestra los resultados de esta cuantificación de resina.

Tabla A.12. Cuantificación de resina en hilos de fibras vegetales

	M	L (m)	Peso (g)	Peso de resina (g)	DL (g/m)	DV (g/m ²)	Resina/Longitud (g/m ²)
Sin Resina	H1	2.5	1	-	0.4	2.04	-
	H2	2.5	1.675	-	0.67	0.5	-
	H3	2.5	10.65	-	4.26	0.44	-
	F	2.5	1.075	-	0.43	2.17	-
	S1	2.5	5.7	-	2.28	0.46	-
	S2	2.5	9.075	-	3.63	0.74	-
	C1	2.5	3	-	1.2	0.67	-
	C2	2.5	8.5	-	3.4	0.48	-
Epoxi	H1	2.5	2.225	1.225	0.89	0.50	0.49
	H2	2.5	5.525	3.85	2.21	1.54	1.54
	H3	2.5	20.8	10.15	8.32	4.05	4.06
	F	2.5	2.3	1.225	0.92	0.50	0.49
	S1	2.5	15.325	9.625	6.13	3.85	3.85
	S2	2.5	20.35	11.275	8.14	4.51	4.51
	C1	2.5	10.325	7.325	4.13	2.93	2.93
	C2	2.5	22.5	14	9.00	5.60	5.6
Poliéster	H1	2.5	2.95	1.95	1.18	0.78	0.78
	F	2.5	3.2	2.125	1.28	0.85	0.85
	S2	2.5	23.4	14.325	9.36	5.73	5.73
	C1	2.5	11.75	8.75	4.70	3.50	3.5

Los parámetros mostrados en la Tabla A.12 fueron determinados mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Densidad Lineal (DL)} = \frac{\text{Peso}}{\text{Longitud}} \quad \text{A.1}$$

$$\text{Densidad Volumetrica (DV)} = \frac{\text{Peso}}{\text{Area transversal}} \quad \text{A. 2}$$

$$\frac{\text{Resina}}{\text{longitud}} = \text{DL. de hilo con resina} - \text{DL. de hilo sin resina} \quad \text{A. 3}$$

A.3.2. Preparación de especímenes

Con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas de los hilos y mechones utilizados en este estudio, fue necesario preparar especímenes de hilos para ensayarlos a flexión.

Para ello fue necesario elaborar un molde de madera con una superficie plana de 60 X 30 cm, sobre la cual se le coloco una lámina de vidrio, con clavos en los extremos para alinear y sujetar los hilos y mechones (ver Figura A.5).

El método de preparación de todas las muestras para el ensayo a tracción fue el siguiente:

- Para evitar la adherencia entre la resina y el molde, se limpió la superficie con acetona y se humedeció con dos desmoldante (Sealer – GP y Z 6.0 Slipcoat System)
- Luego sobre el molde se colocan trozos de fibras de vidrio (mat) en las áreas marcadas en el molde, destinada a ser impregnada. Esto con la finalidad de consolidar los extremos de la fibra, con las fibras de vidrio.
- Una vez colocada la fibra de vidrio en ambos extremos del molde, los hilos y mechones a ensayar colocados sobre esta, para luego ser estirados y anclados en los clavos a los extremos del molde.
- Luego las fibras de vidrio y la zona del hilo o mechón ubicado sobre ella eran impregnadas con la resina epoxi Master Brace P350, luego se colocaba otra lamina de fibra de vidrio de forma que los extremos de los hilos quedaran embebidos dentro del compuesto.

- Luego de un día de curado los especímenes eran desmoldados y luego mecanizados. Los compuestos en los extremos tenían un ancho de 2 cm y una longitud de 4 cm.



Figura A.5. Preparación de especímenes de hilo y mechones para ensayo de tracción

A.3.2. Ensayo a tracción

Una vez preparados los especímenes de hilos y mechones (ver Figura A. 6), se procedió a los ensayos de tracción, el cual consistió en lo siguiente:



Figura A. 6. Ensayo tracción de hilos y mechones

- Los extremos de los hilos y mechones eran sujetos por la pinzan mecánica de la máquina de ensayo mostrada en la Figura A.7 (MTS Insight con una capacidad de

10KN). Una vez sujetado se le aplicaba una pequeña carga de 5 N para estirar el hilo o mechón.

- El extensómetro era colocado en los hilos y mechones, con su abertura inicial de 50 mm (longitud inicial del extensómetro totalmente cerrado). Este se colocaba a través de gomas en los puntos de contacto del extensómetro y los especímenes, esto para evitar deslizamientos y daños en los especímenes. En caso de las muestras de Basalto el sistema de fijación del extensómetro no funciono debido a que no eran mechones consolidados, por lo que se optó por colocar cinta adhesiva en los puntos de contacto entre los especímenes y el extensómetro.
- Una vez colocado el extensómetro, se revisaba que estuviera aplicada la precarga de 5N, para luego empezar el ensayo a una velocidad de 5 mm/min



Figura A.7. Máquina de Ensayo MTS Insight

A.3.3. Proceso de análisis de resultados

Una vez realizados los ensayos los resultados eran procesados y analizados, con herramientas de cálculo (Excel). Los datos obtenidos de los ensayos de tracción fueron las fuerzas resistentes de los especímenes y los desplazamientos asociados a estas (medidos por el extensómetro). A partir de estos datos fue posible hacer el diagrama esfuerzo-deformación, y también identificar la tensión ultima o de rotura, la deformación pico y el módulo de elasticidad de cada espécimen. Estos parámetros fueron determinados a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A} \quad A. 4$$

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L} \quad A. 5$$

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

A. 6

Donde:

Fu: Fuerza ultima alcanzada por el hilo

A: Sección transversal del hilo

ΔL : Desplazamiento del extensómetro.

L: Longitud inicial del extensómetro

σ_1 : 20% de la tensión ultima

σ_2 : 90% de la tensión ultima

ε_1 : Deformación en σ_1

ε_2 : Deformación en σ_2

El módulo de elasticidad fue calculado, considerando la parte lineal de los diagramas esfuerzo-deformación el cual correspondía a la diferencia entre el 20% y el 90% de la carga ultima.

A.4. Caracterización de morteros

De cada mezcla de mortero utilizada en este estudio (Nivoplan, Sika y Kerakoll) se tomaron muestra de morteros en moldes de 40×40×160 mm (Figura A.8), para fines de ensayo a control de los morteros.



Figura A.8. Molde de Probetas control de morteros

A.4.2. Ensayo a flexion

El ensayo para la determinación de la resistencia a flexión y tracción de las probetas de mortero se realizó según la normativa EN 1015-11:2000 [114], la cual determina la ejecución de un ensayo a 3 puntos con aplicación de la carga en el centro de la luz y una separación entre soportes de 100 mm (Figura A.9). Para asegurar la estandarización de los resultados, los ensayos se ejecutaron mediante una herramienta normalizada para este propósito (Figura A.9).

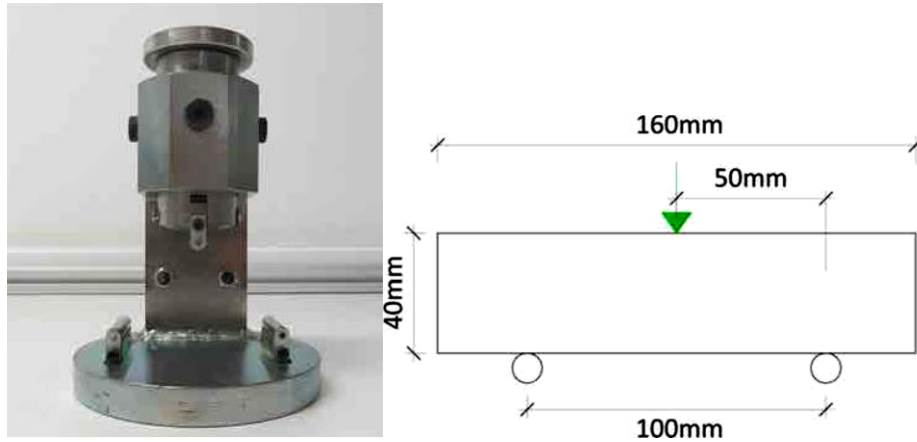


Figura A.9. Ensayo a flexión de probetas control

La aplicación de la carga fue ejecutada mediante control por fuerza a una velocidad de 10 N/s con una prensa de ensayos electromecánica con capacidad de carga de 50 kN (Figura A.10).



Figura A.10. Máquina de ensayo Suzpecar

El procedimiento de ensayo se describe a continuación:

- Posicionamiento del espécimen de forma que esta tuviese contacto total con la parte trasera de la herramienta de ensayo. Posicionamiento longitudinal del espécimen de forma que este estuviera centrado respecto al punto de aplicación de la carga.
- Descenso de la herramienta de aplicación de carga mediante el uso de la prensa electromecánica hasta alcanzar la separación de 1mm con el espécimen a ensayar.
- Inicio de la adquisición de datos y aplicación de carga mediante control por fuerza a una velocidad de 10 N/s. Las variables registradas fueron el desplazamiento vertical de la herramienta de aplicación de carga y la fuerza aplicada por la prensa electromecánica. Estas fueron adquiridas a 5 Hz.

Las dos partes resultantes de la probeta fracturada fueron utilizadas posteriormente para los ensayos a compresión.

A.4.3. Ensayo a compresión

El ensayo para la determinación de la resistencia a compresión de las probetas de mortero se realizó según la normativa EN 1015-11:2000 [58], la cual determina la ejecución de un ensayo de compresión directa en un volumen cúbico de mortero de 40 mm de lado. Con el propósito de no manufacturar especialmente probetas para este ensayo, se aprovecharon cada una de las mitades obtenidas del ensayo a flexión desarrollado con anterioridad (Figura A.11).

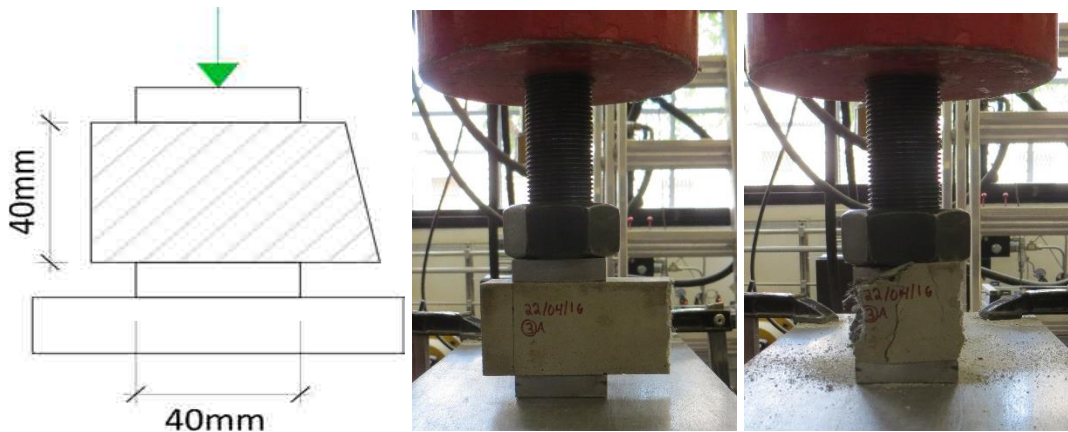


Figura A.11. Ensayo de probetas control a compresión

Para asegurar la correcta distribución de los esfuerzos, los ensayos se ejecutaron utilizando dos placas metálicas de 40x40x10mm en ambos lados de la probeta. La aplicación de la carga

se realizó mediante control por fuerza a una velocidad de 350 N/s utilizando un actuador oleohidráulico de capacidad 100 kN.

El procedimiento de ensayo se describe a continuación:

- Posicionamiento de la probeta de forma que las dos placas metálicas estuvieran alineadas y dentro de la región sin fisurar de la probeta de mortero. Alineación del sistema en el plano respecto al actuador oleohidráulico.
- Descenso del actuador oleohidráulico hasta alcanzar el contacto con la placa metálica superior (Figura A.36).
- Inicio de la adquisición de datos y aplicación de carga mediante control por fuerza a una velocidad de 350N/s. Las variables registradas fueron el desplazamiento vertical y la fuerza aplicada por el actuador oleohidráulico. Estas fueron adquiridas a 50Hz.

A.4.4. Resultados experimentales de los ensayos en morteros

Los resultados de los ensayos realizados en probetas de mortero se obtuvieron según las siguientes consideraciones:

La resistencia a flexión del mortero (f_{mx}) se obtuvo suponiendo una distribución tensional lineal en la sección más solicitada del espécimen en el momento de carga máxima, de la siguiente manera (ecuación A.7):

$$f_{mx} = 1.5 \frac{F_{max}L}{bh^2} \quad A. 7$$

Donde F_{max} es la fuerza máxima aplicada en el ensayo de tres puntos, L es la distancia entre soportes y b_h son las dimensiones de la sección transversal de la probeta.

La resistencia a tracción del mortero (f_{mt}) se obtiene a partir de la resistencia a flexión (f_{mx}) usando la formulación incluida en EHE-08 [85]:

$$f_{mt} = f_{mx} \frac{1.5 \left(\frac{h}{100}\right)^{0.7}}{1 + 1.5 \left(\frac{h}{100}\right)^{0.7}} \quad A. 8$$

Donde h (mm) es la altura de la probeta.

La resistencia a compresión del mortero (f_{mc}) se obtuvo suponiendo una distribución tensional constante en la sección del espécimen en el momento de carga máxima:

$$f_{mc} = \frac{F_{max}}{b^2}$$

A. 9

Donde F_{max} es la fuerza máxima aplicada en el ensayo de compresión directa y b es la base de la probeta.

En las siguientes tablas se incluye el código del espécimen, la edad de la probeta y los valores de resistencia tensional correspondientes. En la Tabla A.13 se muestra un resumen de las características mecánicas de los morteros, incluyendo la media de los resultados y el coeficiente de variación.

Tabla A.13. Resultados de ensayo a flexión y a compresión de morteros

Muestra	Resistencia a flexión (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	
Nivoplan	N-01	5.59	2.46	9.04
	N-02	4.96	2.19	7.93
	N-03	4.43	1.96	7.21
	N-04	4.69	2.07	8.43
	N-05	4.69	2.07	9.08
	N-06	4.41	1.95	9.64
Promedio	4.79	2.12	8.56	
C.V	8.29%	8.29%	9.42%	
Sika	S-01	6.17	2.72	37.81
	S-02	6.14	2.71	42.81
	S-03	6.91	3.05	39.62
	S-04	6.97	3.08	36.95
	S-05	6.70	2.96	39.71
	S-06	6.48	2.86	38.51
	S-07	4.86	2.14	31.99
	S-08	4.93	2.18	33.41
	S-09	5.34	2.36	34.23
	S-10	4.78	2.11	38.10
	S-11	4.89	2.16	38.36
Promedio	5.83	2.57	37.41	
C.V	14.48%	14.48%	7.97%	

A.5. Caracterización de FRCM a tracción

A.5.1. Preparación de especímenes de FRCM

Con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas de FRCM de fibras vegetales se elaboraron especímenes de FRCM para ensayarlos a tracción.

Para elaborar estos especímenes se fabricaron moldes de madera de con espacios rectangulares de 10×50×400 mm (ver Figura A. 12), dichas dimensiones han sido utilizadas por otros estudios. Cada molde contenía 15 espacios rectangulares, Por lo que se producía 15 especímenes por cada molde.

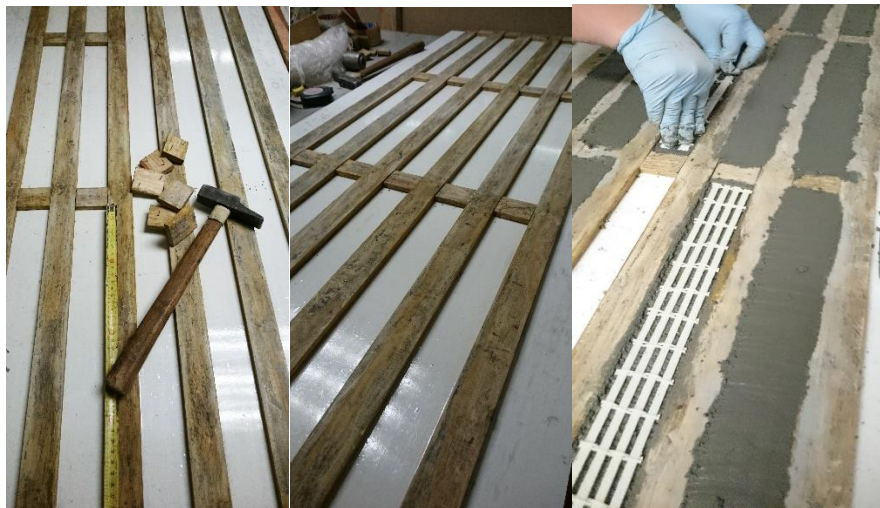


Figura A. 12. Preparación de molde y especímenes de FRCM

Los moldes eran cubiertos por una fina capa de desmoldante (vaselina), para facilitar desmolde de los especímenes de FRCM.

Una vez preparado los moldes se procedía realizar la mezcla de mortero. Para ellos se pesaba de manera separa el mortero a utilizar y el agua, de acuerdo a la dosificación especificada por los fabricantes del mortero. Luego la mezcla era realizada con un taladro con broca helicoidal.

Luego de hacer la mezcla se procedía a colocar una primera capa de mortero en los moldes, utilizando una pieza de aluminio para enrasar un espesor de 6 mm, para luego colocar la malla de forma que esta quedara parcialmente embebida en el mortero.

Luego de colocar las mallas estas eran cubiertas por una segunda capa de mortero, para asegurar un espesor de 10mm.

Estos especímenes eran curados en condición ambiente de laboratorio, y desmoldados a los 7 días de curado.

Luego de ser desmoldados se le colocaba un en los extremos de los especímenes placas metálica de ambos lados, con una resina epoxi bicomponente (ver Figura A.13). La longitud de espécimen adherido a la placa era de 100 mm.

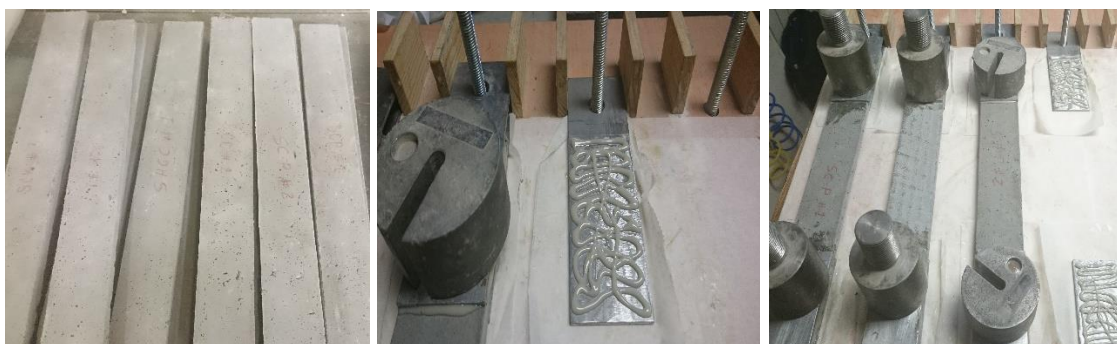


Figura A.13. Colocación de placas de apoyo

A.5.2. Ensayo de FRCM a tracción

Luego de 28 días de curado los especímenes eran ensayados a tracción. Para estos ensayos se utilizó la prensa electromecánica MTS Insight de 10 KN de capacidad (Figura A.14).

Para sujetar las probetas de FRCM se colocó en la maquina dos horquillas (una en cada extremo) sujetado a la maquina a través de dos placas metálicas. Esta horquilla sujetaba las probetas de FRCM a través de un pasador que pasaba a través de las placas de apoyo de las probetas y la horquilla. Una vez colocada la probeta, se lograba la alineación de la probeta por gravedad, aplicando una pequeña precarga de 5 N.

Una vez colocada las probetas de FRCM, se le colocaba un extensómetro de 25 mm de alcance, para ello fue necesario, colocar 2 piezas en forma de L unida a los bordes de la placa de apoyo a mediante dos imanes. Luego de colocar las piezas en forma de L, se colocaba el extensómetro sobre las piezas, la cuales tenían ranuras que evitaban el deslizamiento del extensómetro. Esta configuración permitía medir las deformaciones en la longitud libre de FRCM (entre los bordes de las placas de apoyo), con una longitud inicial de 200 mm.



Figura A.14. Configuración de ensayo a tracción de FRCM

Luego de colocar y alinear el extensómetro, se empezaba el ensayo a una velocidad de 5mm/min.

A.5.3. Proceso de análisis de resultados a tracción de FRCM

Los resultados obtenidos eran procesados y analizados, con herramientas de cálculo (Excel). Los datos registrados de los ensayos de tracción eran las fuerzas resistentes de los especímenes y los desplazamientos medidos por el extensómetro asociados a estas. A partir de estos datos fue posible hacer el diagrama esfuerzo-deformación, y también identificar la tensión de fisuración, tensión última o de rotura, la deformación pico y el módulo de elasticidad en cada etapa.

La tensión de fisuración fue calculada con la siguiente ecuación:

$$\sigma_{cm} = \frac{F_f}{A_{FRCM}} \quad A. 10$$

Y la tensión última con la ecuación:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_{malla}} \quad A. 11$$

Donde:

F_f : Carga de la primera fisura.

A_{FRCM} : Sección bruta del FRCM

A_{malla} : Sección transversal de la malla

Y la deformación pico eran determinadas utilizando la ecuación A.5.

Para el cálculo del módulo de elasticidad se tomó como referencia el modelo trilineal ACK. Por lo que se calcularon 3 módulos de elasticidad utilizando la ecuación A.6, pero en este caso σ_1 y σ_2 eran dos puntos cualesquiera que definían la pendiente correspondiente. La definición de cada módulo se describe a continuación:

EI: es el módulo de elasticidad en la primera pendiente del diagrama esfuerzo deformación, el cual fue calculado considerando la sección bruta de FRCM (500 mm^2), pues este módulo corresponde a la etapa donde el mortero y la malla sufren la misma deformación.

EII: es el módulo correspondiente a la etapa II, la cual comienza después de la primera fisura del mortero, debido a que en la sección fisurada quien absorbe las tensiones es la malla, para el cálculo de este módulo se utilizó el área de sección transversal de la malla. Este módulo fue calculado en la segunda o tercera (dependiendo de la linealidad presentada por la pendiente) pendiente del diagrama esfuerzo deformación.

EIII: este es el módulo de elasticidad en la etapa III, la cual empieza cuando el mortero ya no es capaz de producir más fisuras, por lo que tiende a aumentar el ancho de fisura en las secciones fisuradas. En esta etapa solo interviene la malla, por lo que el módulo se calculó también utilizando el área transversal de la malla. Este módulo se calculó en la última pendiente del diagrama esfuerzo deformación antes del fallo final de la probeta.

A.6. Adherencia del FRCM

A.6.1. Preparación de especímenes de FRCM

Para la elaboración de los especímenes se siguió el siguiente procedimiento:

- Adherirle una lámina de FRP de fibra de vidrio en uno de los extremos de las mallas mecanizadas a utilizar, para que estas puedan ser sujetadas por la pinza mecánica de la máquina de ensayo, y esperar un día para que endurezca.
- Adherirle a la malla una lámina de aluminio en forma de L en el extremo de la longitud de malla (150 mm) a embeber en el mortero.
- Marcar el área del ladrillo donde se colocará el FRCM
- Hacer los agujeros a los ladrillos para la colocación del LVDT

- Preparar moldes de madera en forma de marco para moldear el FRCM
- Cubrir el molde con desmoldante (vaselina), para la facilitar el desmolde de los especímenes.
- Limpiar y sumergir los ladrillos en agua
- Hacer la mezcla del mortero
- Colocar un molde de madera
- Colocar el mortero asegurando un espesor de 6 mm
- Colocar la malla mecanizada, de forma que quede parcialmente embebida en el mortero, y apoyando el extremo libre.
- Colocar la segunda capa de mortero a asegurando un espesor de 10 mm.
- Colocar papel de horno sobre los especímenes de FRCM, y luego colocar peso y retirar el molde cuidadosamente.

A.6.2. Ensayo de adherencia de FRCM

Para el ensayo de adherencia se siguió el siguiente procedimiento:

- Colocar el LVT de 20 mm en ladrillo para registrar las deformaciones de la malla
- Conectar el LVT y los sensores de carga de la Maquina de ensayo (Suzpecar) a un adquisidor de datos MGS-plus, para registrar los datos de carga y deformación del ensayo a frecuencia de 50Hz.
- Sujetar el ladrillo al soporte metálico diseñado para este ensayo, y revisar la alineación de la malla
- Someter la probeta a una precarga de 5N
- Comenzar el ensayo a una velocidad de 0.5 mm/min.

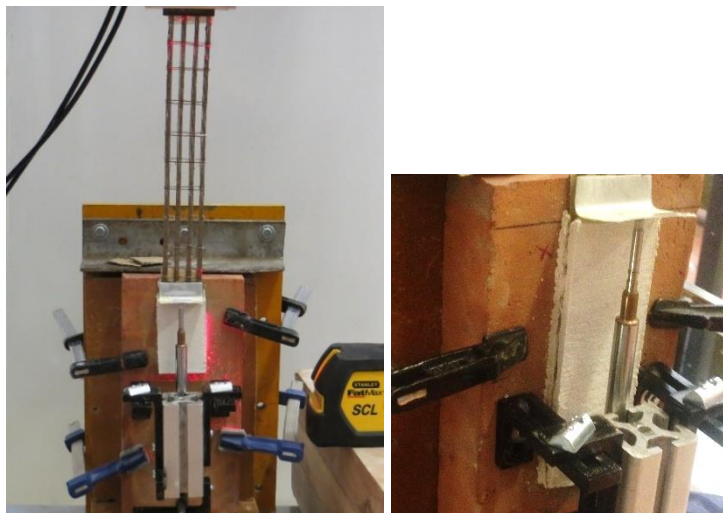


Figura A.15. Configuración de ensayo de adherencia

A.6.3. Proceso de análisis de resultados de ensayo de adherencia de FRCM

Los datos registrados de los ensayos de tracción eran las fuerzas resistentes de los especímenes y las deformaciones medida por LVDT. A partir de estos datos fue posible conocer la fuerza ultima según el tipo de fallo que se presentó. Sin embargo, en el caso de las deformaciones esta no fueron utilizadas en este estudio, debido al deslizamiento del LVDT durante el ensayo.

Anexo B. Datos experimentales de ladrillos, mortero de juntas, muros sometidos a carga cíclicas.

B.1. Introducción

Este anexo es presentado con el objetivo de describir de una manera más extensa, los proceso y métodos utilizados para la fabricación y refuerzo de los muros de mampostería. Así como también describir los procedimiento y métodos de ensayos utilizados para caracterizar los materiales utilizados para la fabricación de estos muros (ladrillos y mortero de juntas).

También en este anexo se describe de manera más extensa el diseño de la configuración utilizada para el ensayo de los muros sometidos a carga cíclica, el procedimiento de ensayo y la forma de procesar los datos resultantes de los ensayos.

B.2. Materiales

B.2.1. Ladrillo

Para la fabricación de los muros y los ensayos de adherencia se utilizaron ladrillos industriales proporcionados por la empresa Calvente Hermanos, estos ladrillos habían sido caracterizado por otro estudio realizado en LITEM [69].

B.2.2. Mortero de juntas

Para las juntas de los muros se utilizó el mortero Kerakoll- Biocalce-Muro, un mortero eco-compatible de cal natural pura NHL 3.5, conforme a la norma EN 459-1, comúnmente

utilizado para la ejecución y reparación transpirable de muros y fábricas, idóneo para el GreenBuilding y en la Restauración Histórica. Es un material antibacteriano y antimoho natural, contiene sólo materias primas de origen estrictamente natural, reciclable como árido después de su vida útil, Biocalce-Muro es un mortero de clase M5 específico para la construcción, la rehabilitación y la reparación transpirable de muros portantes y de cerramiento de ladrillo, tufo volcánico, piedra y paredes mixtas.

Las propiedades del mortero Kerakoll suministradas por el fabricante se muestran en la Tabla B.1.

Tabla B.1. Propiedades de mortero KeraKoll-Biocalce-Muro

Naturaleza química del ligante (EN 459-1)	Cal Hidráulica Natural Pura NHL 3.5
Intervalo granulométrico (EN1015-1)	0 – 2,5 mm
Densidad aparente del polvo (UEAtc)	≈ 1,38 kg/dm ³
Envase Sacos	25 kg
Agua de amasado	≈ 4,8 l / 1 saco 25 kg
Consistencia mortero fresco (EN1015-3)	≈ 178 mm
Densidad aparente del mortero fresco (EN 1015-6)	≈ 1,94 kg/dm ³
Densidad aparente del mortero endurecido seco (EN 1015-10)	≈ 1,76 kg/dm ³
pH mezcla	≥ 12
Temperaturas límite de aplicación de	+5 °C a +35 °C
Rendimiento	≈ 1,7 kg/dm ³
Resistencia a compresión categoría (EN 998-2)	50 kg/cm ² (M5)
Reacción al fuego (EN 13501-1)	clase A1
Resistencia a cizalladura inicial (EN 1052-3)	≥ 0,2 N/mm ²
Adherencia al soporte (ladrillo) (EN 1015-12)	≥ 0,42 MPa N/mm ² - FP: B

Ensayo a flexión y compresión

Al igual que los morteros presentados en el apartado A.2.4, se tomaron muestras del mortero Kerakoll, para luego someterlo a ensayos de flexión y compresión. Los ensayos fueron ejecutados con el mismo procedimiento descrito en el apartado A.4. Los resultados obtenidos de estos ensayos se muestran en la Tabla B.2.

Tabla B.2. Resultados de ensayo de probetas control Kerakoll

Mortero	Espécimen	Resistencia a Flexión (MPa)	Resistencia a Tracción (MPa)	Resistencia a Compresión (MPa)
Kerakoll	K-01	3.90	1.72	4.58
	K-02	3.85	1.70	5.00
	K-03	3.44	1.52	4.47
	Promedio	3.73	1.65	4.68
	C.V	5.55%	5.55%	4.85%

B.2.3. FRCM de refuerzo

El mortero utilizado para el refuerzo de los muros fue el mortero Sika-MonoTop descrito en el apartado A.2.4.

En el caso de la malla de fibras vegetales se elaboraron 8 mallas, 4 con el hilo de cáñamo de 0.5 mm (H_1), 4 con el hilo de algodón de 1.5 mm (C_1).

Estas se elaboraron mediante el siguiente procedimiento:

- Se elaboró dos moldes de sección rectangular con unas dimensiones de 90×90 mm y 94×135 cm, con clavos en sus extremos distanciados 30 mm en dirección de la trama, y 40 mm en dirección de la urdimbre, para estirar y anclar los hilos.
- Se tejieron los hilos formando una malla. Se estiraron los hilos a través del clavo en dirección de urdimbre, y en dirección de la trama se entrelazaron los hilos utilizando una aguja, creando una malla bidireccional con geometría y propiedades comparable con algunas mallas comerciales comúnmente utilizadas para refuerzo de muros.
- Se pesó la cantidad de resina y catalizador a utilizar basado en la cantidad de resina estimada presentada en Tabla A.12 agregando un 10% de desperdicio, y luego se mezcló con un agitador.
- Se recubrieron las mallas con resina epoxi, de manera manual con un pincel. Se escogió la resina epoxi debido las mejores propiedades que presentaron los FRCM con malla recubiertas con epoxi, frente a los de malla recubiertos en poliéster.
- Luego de endurecer la resina, las mallas fueron cortadas en sus extremos, para poder desmoldar.
- Luego se midieron y pesaron para determinar la cantidad de resina aplicada.

Además de las mallas de fibras vegetales elaboradas, también se utilizó la malla Mapegrid-G220 descrita en el apartado A.2.2. Esto con la finalidad de poder comparar los muros

reforzado con fibras vegetales con muros reforzados con esta malla comercial de fibra sintética.

B.3. Fabricación de muros de mampostería y refuerzo

Se fabricaron 10 muros de 90×100 cm. Los muros de 90×100 cm, de estos 8 fueron reforzados, 2 fueron reforzados solo con mortero, 2 con FRCM de cáñamo, 2 con FRCM de algodón, y 2 FRCM de fibra de vidrio. El proceso de construcción y refuerzo fue el siguiente:

- Se cortaron ladrillo en sección de 6 cm, de 21 cm, y 12 cm de los ladrillos.
- Los ladrillos eran humedecidos
- Se preparaba la mezcla del mortero para la junta
- Los muros eran construidos sobre un elemento de manipulación metálico, utilizando un marco de madera para que quedara alineado con respecto al elemento de manipulación.

Luego de mínimo 7 días curado, los muros eran reforzados. Para ello el proceso fue el siguiente:

- Se humedecía la cara a reforzar,
- Se colocaba una primera capa de mortero,
- Se colocaba la malla a utilizar de forma que quedara parcialmente embebida en la primera capa de mortero,
- Finalmente se colocaba la segunda capa de mortero de forma que la malla quedara totalmente embebida entre las dos capas de mortero.

Este procedimiento fue aplicado para las dos caras de los muros.

B.4. Ensayo por carga cíclica de muros

Luego de aproximadamente 6 meses de haber aplicado el refuerzo (en tales casos) a los muros de mampostería, estos eran sometidos a ensayo por carga cíclica. Para ello fue necesario diseñar una configuración de ensayo que se ajustara a los espacios e equipos disponible en el laboratorio (LITEM).

Diseño de configuración de ensayo:

Para realizar este ensayo LITEM cuenta con un marco metálico de 2.14×2.3 m, compuesto de dos vigas y dos pilares. En este fue posible montar el muro y realizar este ensayo.

Un parámetro a determinar para realizar este ensayo fue la carga vertical de compresión a aplicar sobre el muro. Para ello se hizo un cálculo aproximado de la carga soportada por un muro de carga de una casa de 2 niveles, la cual resulto igual a 25 KN. Para aplicar esta carga se dispuso de un actuador olihidraulico MTS de 50 KN de capacidad.

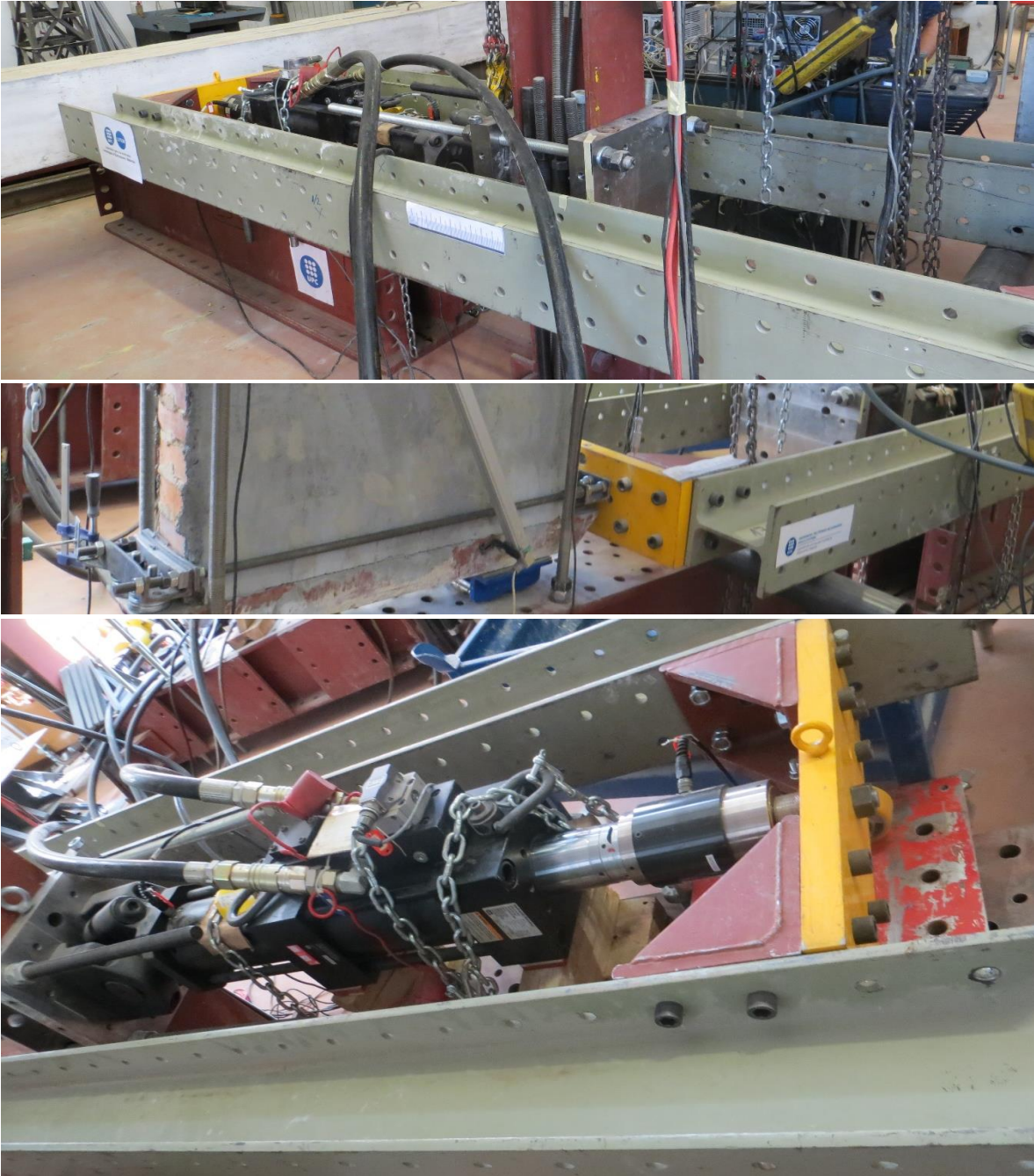


Figura B. 1. Estructura de aplicación de carga cíclica

Luego fue necesario decidir el punto de aplicación de la carga cíclica. Para la aplicación de esta carga se utilizó un actuador olio-hidráulico MTS de 250 KN con una rótula en el punto de fijación. Debido a la dificultad que suponía limitar el giro del actuador en una cota elevada (debido a la rótula) se decidió aplicar la carga cíclica en el extremo inferior lateral del muro.

Por a otro lado debido, a que el ancho de los muros y la longitud inicial del actuador, hacían imposible la colocación del muro y actuador dentro del marco metálico de ensayo, fue necesario colocar el actuador en dirección contraria al muro, y aplicar la carga cíclica en el muro a través de un marco que conectaba la cabeza del actuador con el muro.

Para construir esta estructura de aplicación de carga cíclica en forma de marco, se utilizaron perfiles metálicos, unidos a placas a través de piezas en forma de L, mediante tornillos de alta resistencia. Esta estructura estaba sobre un cilindro metálico en un extremo, y sobre ruedas de carga en el otro extremo, los cuales le permitían el movimiento en dirección horizontal, haciendo esto posible la aplicación de la carga cíclica sobre el muro.

Para logra el desplazamiento de los muros en la parte inferior de este (donde era aplicada la carga cíclica), los muros eran colocados sobre dos patines de carga con una capacidad soporte de 1 tonelada cada uno.



Figura B.2. Patines de carga

En los extremos derecho e izquierdo de la parte superior de la longitud libre de muro se colocaron elemento de topes entre el muro y los pilares del marco de ensayo, esto para limitar los desplazamientos en estos puntos.

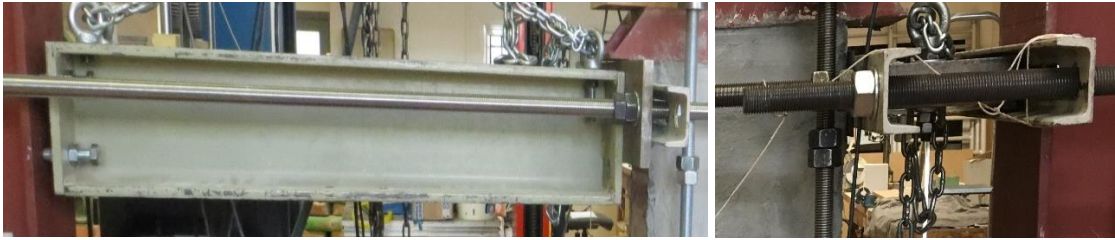


Figura B.3. Topes laterales para limitar el deslizamiento

También se colocaron estructura en forma de marco, formados por barras y perfiles metálicos que fueron útiles para evitar los giros en el muro producidos aplicación de la carga. En dirección vertical las barras de acero estaban conectadas a células de carga de 100 KN, para medir la carga soportada por estos marcos para evitar el giro del muro.



Figura B. 4. Estructura de impedimento de giro del muro bajo carga cíclica

Se colocaron Potenciómetros 3 LWR para medir los desplazamientos producidos en los muros. Dos en dirección diagonal de los muros (uno en cada cara), y otro sujeta al pilar del marco y conectado al extremo opuesto del punto de aplicación de la carga cíclica.



Figura B.5. Colocación de potenciómetros (LWR)

Los ciclos de carga a aplicar sobre la estructura fueron definidos según la norma ASTM-E-2126-02a [73]. Para estos cálculos se supuso un desplazamiento pico de 40 mm. Los siglos de carga aplicados se muestran en la figura B.2.

Para registrar las mediciones de carga y desplazamientos, obtenidos por los diferentes sensores utilizados en este ensayo se utilizó un adquisidor de datos MGS plus a una frecuencia de adquisición de 50 Hz.

B.4.1. Procedimiento de ensayo

Una vez definido el sistema de aplicación de carga, se procedió a realizar el ensayo, este se realizó siguiendo el siguiente procedimiento:

- Transportar el muro a ensayar utilizando un transpaquete y perfiles metálicos unidos a los elementos de sujeción de muro a través de barras metálicas.
- Luego el muro era subido y alineado, sobre los patines de carga colocados sobre el marco de ensayo. Los muros eran colocados utilizando un apilador eléctrico, y un alineador láser para alinear el muro con respecto a los actuadores.
- Una vez colocado el muro a ensayar este se conectaba la estructura de aplicación de carga, a través de barra y perfiles metálicos que conectaban el extremo opuesto al punto de aplicación de carga a la estructura y punto de aplicación de carga. Garantizando de esta manera la sujeción de la parte inferior del muro a la estructura de aplicación de carga.



Figura B.6. Conexión de muro con estructura de aplicación de carga cíclica

- Luego el muro era sujetado en la parte superior de forma que quedara parcialmente comprimido por los topes laterales y marcos verticales colocados para evita el giro del muro durante el ensayo.
- Se colocaban los LWT, y se conectaban todos los sensores a utilizar en el adquisidor de datos MGS-plus. Probado la funcionalidad de cada sensor antes del ensayo.
- Se aplicaba la carga de compresión de 25 kN sobre el muro.
- Se apretaba parcialmente las tuercas del marco vertical, y se registraba la carga aplicada.
- Finalmente se empezaba el ensayo aplicando los ciclos de carga sobre el muro. El ensayo no era detenido hasta observar la rotura total del muro o el descenso de aproximadamente un 20% de la carga máxima [73].

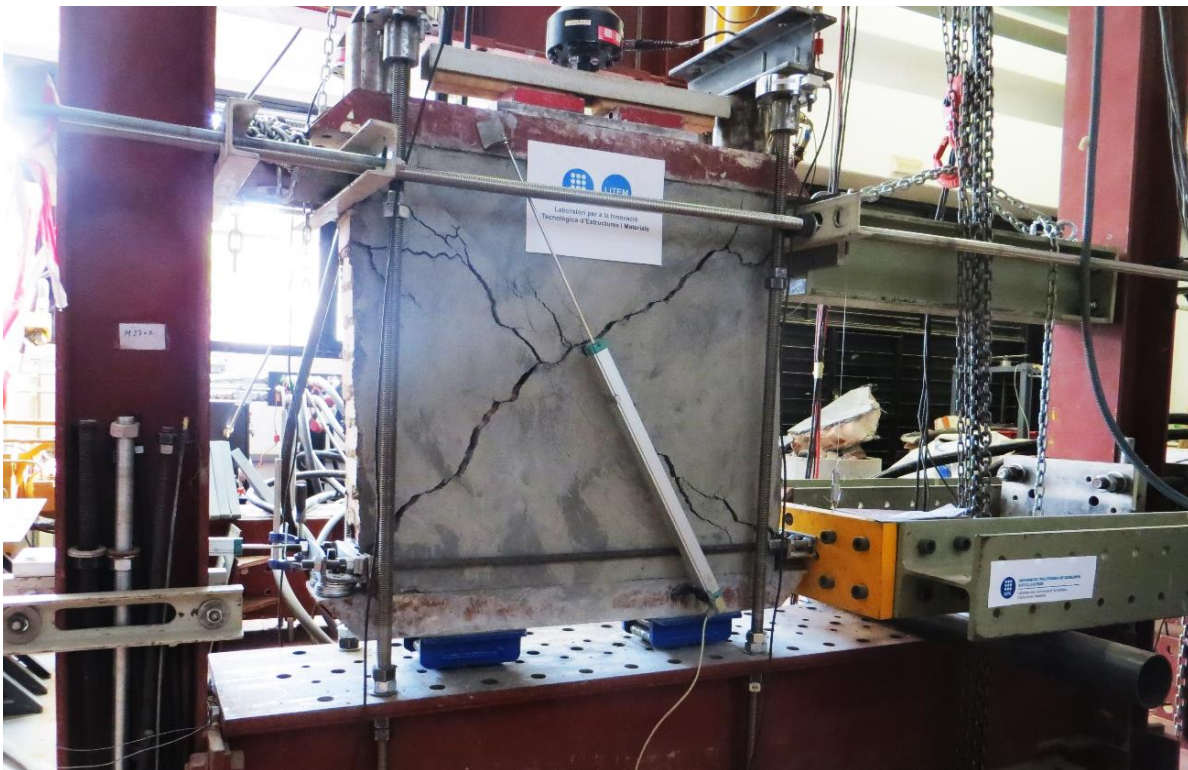


Figura B.7. Ensayo de carga cíclica

A raíz de los ensayos por carga cíclica, los muros con y sin refuerzo presentaron los fallos presentados en la Figura B.8.

WN



WN1

WN2

WMN



WMN1

WMN2

WG



WG1

WG2

WH



WH1



WH2

WC



WC1

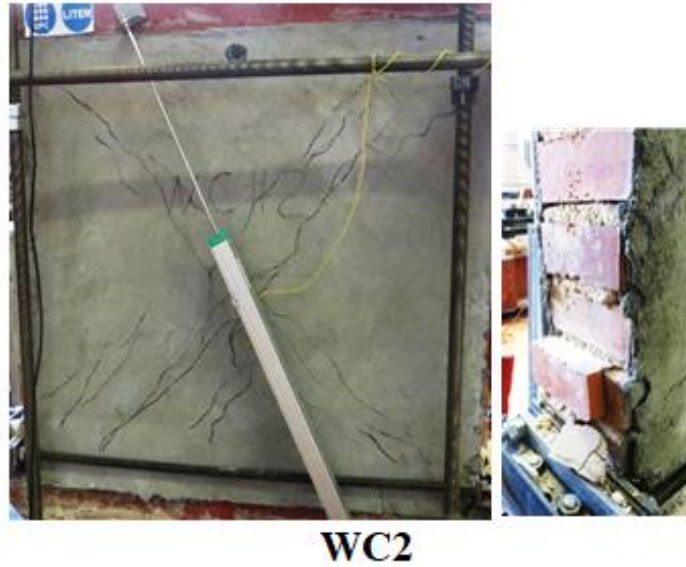
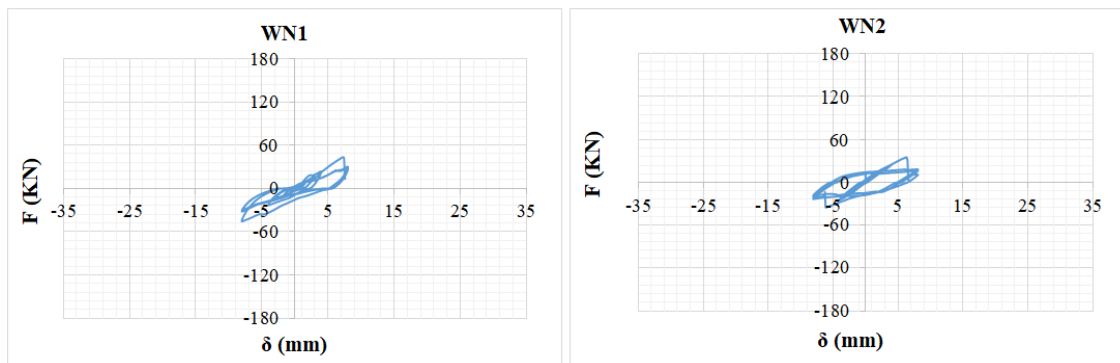


Figura B.8. Fallos de muros reforzados y sin reforzar

B.5. Proceso de análisis de resultados de ensayo por carga cíclica

De los ensayos por carga cíclica se registraron las fuerzas y desplazamiento aplicados al muro hasta la rotura del muro. Estos datos fueron utilizados para la elaboración de un diagrama de histéresis descrito por los desplazamientos en el eje x, las fuerzas aplicadas en dirección en la misma dirección. A partir de estos datos también fue posible determinar, el modelo bilineal idealizado. Estos son presentados en las Figura B.9 y B.10.



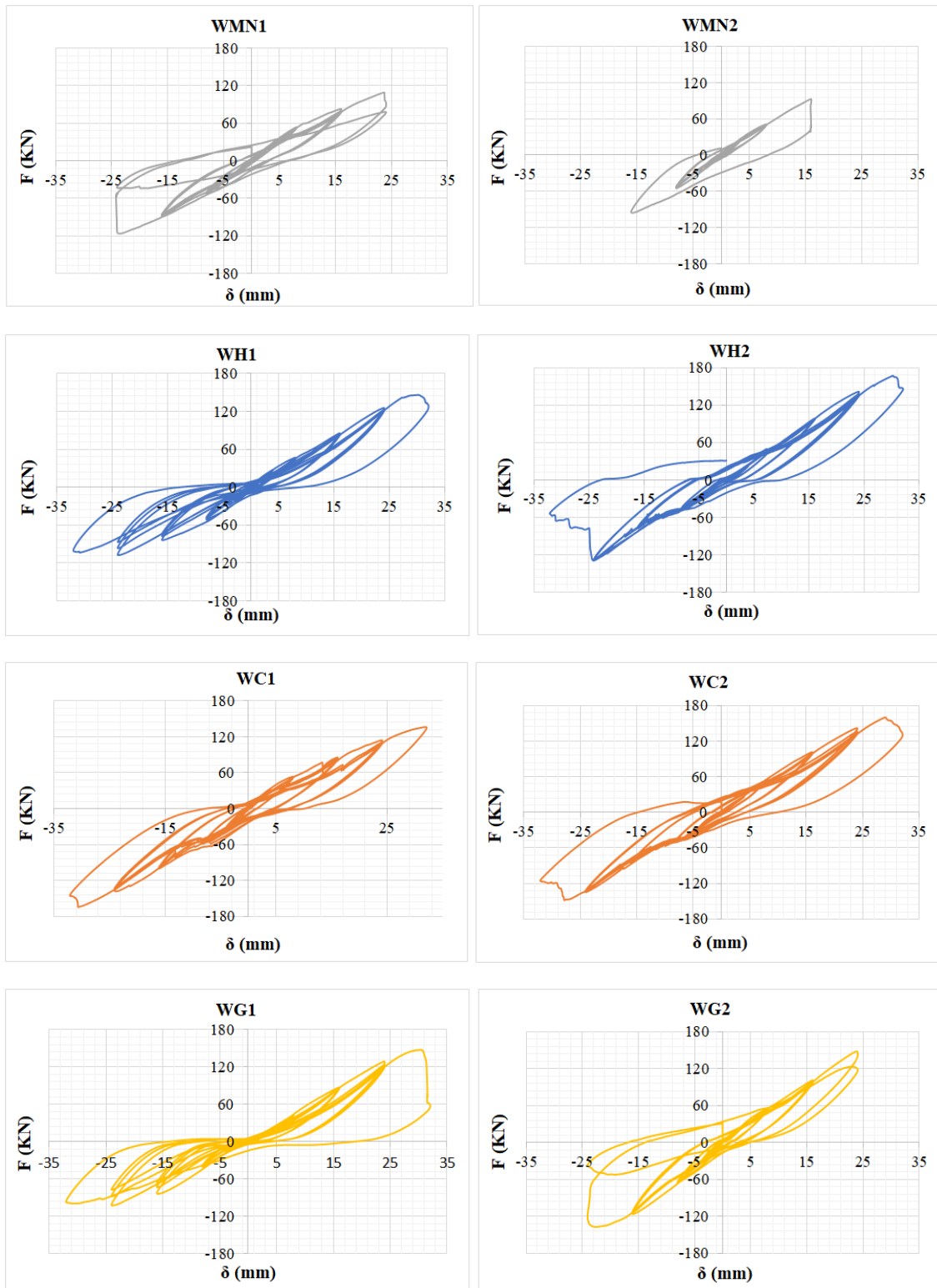


Figura B.9. Diagrama de histéresis

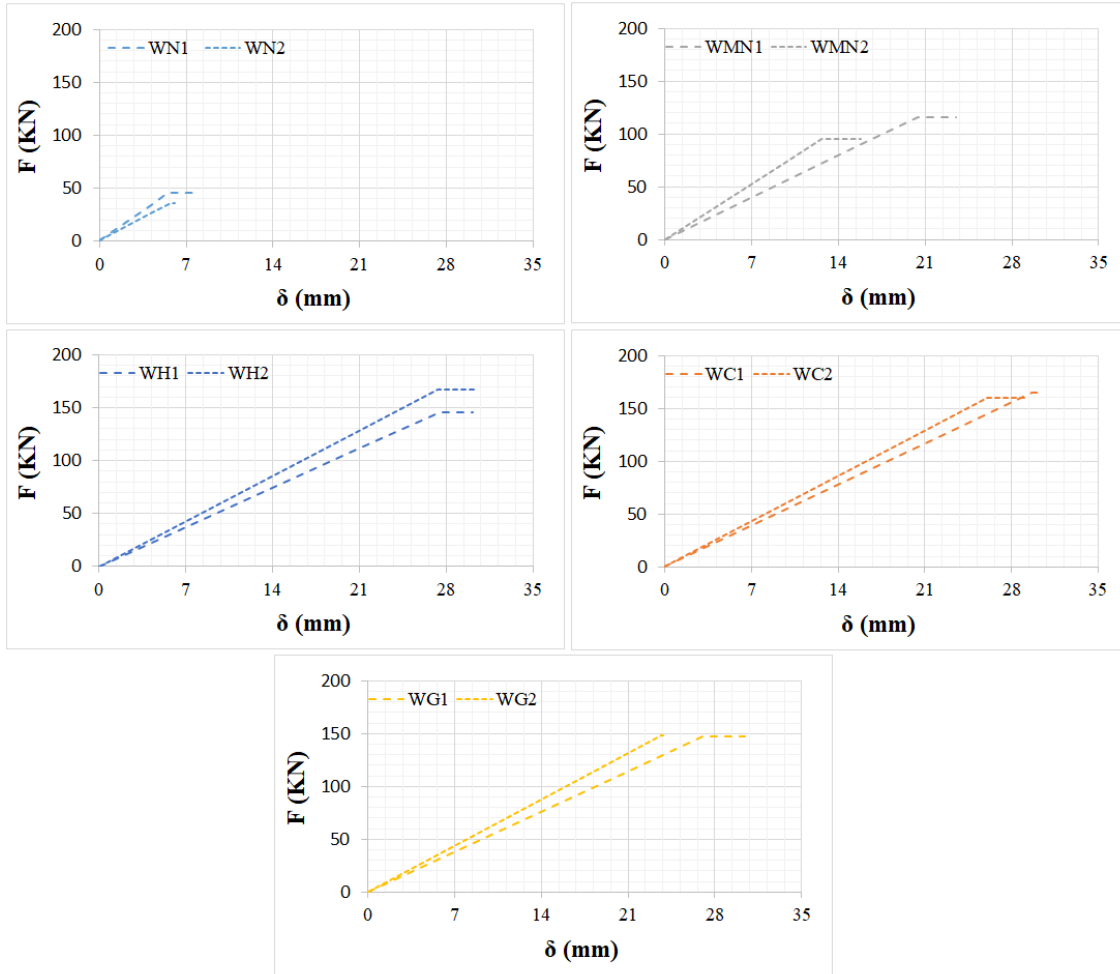


Figura B.10. Modelo bilineal

En la Tabla B.3 se presentan los valores de carga máximas (V) con sus respectivos desplazamientos (δ), para cada dirección de carga en cada ciclo, junto con estos se presenta la energía aplicada (E_p) y disipada (E_d) por ciclo. A partir de estos datos fue posible determinar la curva de degradación de rigidez, el factor de amortiguamiento, la deriva residual y el índice de daño para cada muro. Los gráficos que representan estas propiedades para cada muro se presentan a continuación:

Tabla B.3. Valores de máximos por ciclo desplazamiento impuestos

WN1					
$\delta^+(\text{mm})$	$V^+(\text{KN})$	$\delta^-(\text{mm})$	$V^-(\text{KN})$	$E_d(\text{KN-mm})$	$E_p(\text{KN-mm})$
0.47	2.18	-0.49	-5.10	1.52	0.88
0.83	4.31	-0.83	-6.55	3.04	2.25
1.67	9.63	-1.66	-9.42	11.36	7.93
2.98	16.73	-2.98	-13.73	30.56	22.68
3.97	23.73	-3.98	-23.28	90.67	46.73
7.28	43.32	-7.95	-45.08	361.61	168.48

WN2					
$\delta^+(\text{mm})$	$V^+(\text{KN})$	$\delta^-(\text{mm})$	$V^-(\text{KN})$	$E_d(\text{KN-mm})$	$E_p(\text{KN-mm})$
0.44	4.21	-0.45	-2.89	0.40	0.79
0.79	7.10	-0.80	-5.27	1.41	2.46
1.66	13.28	-1.66	-11.53	6.06	10.29
3.00	20.62	-2.99	-19.87	18.82	30.32
4.02	25.12	-4.01	-24.76	31.27	50.08
6.32	35.44	-6.11	-35.61	412.41	110.34

WMN1					
$\delta^+(\text{mm})$	$V^+(\text{KN})$	$\delta^-(\text{mm})$	$V^-(\text{KN})$	$E_d(\text{KN-mm})$	$E_p(\text{KN-mm})$
0.50	4.97	-0.49	-4.60	0.55	1.19
0.84	7.97	-0.84	-7.75	1.50	3.28
1.68	14.21	-1.68	-13.97	6.51	11.82
3.00	23.39	-3.02	-22.45	18.01	34.50
4.01	30.20	-4.02	-28.25	27.22	58.69
8.01	53.73	-8.03	-51.94	121.20	211.84
8.02	52.70	-8.04	-50.93	93.63	208.06
8.02	52.11	-8.04	-50.51	84.40	206.00
15.98	82.69	-15.99	-89.52	748.10	688.36
16.02	79.48	-16.03	-87.65	582.73	669.49
16.03	78.01	-16.04	-86.07	536.61	657.65
23.70	108.93	-23.47	-116.22	2522.21	1327.38

WMN2					
δ^+(mm)	V⁺(KN)	δ^-(mm)	V⁻(KN)	E_d(KN-mm)	E_p(KN-mm)
0.50	5.18	-0.47	-4.45	1.01	1.18
0.84	8.04	-0.82	-7.49	2.67	3.21
1.68	14.38	-1.67	-13.84	8.76	11.84
3.01	23.82	-3.00	-23.33	24.92	35.40
4.02	30.54	-4.00	-30.04	40.70	60.73
8.02	51.17	-8.01	-55.06	192.46	212.78
8.03	50.51	-8.03	-53.27	150.45	208.29
8.03	49.78	-8.03	-52.14	133.20	204.62
15.97	92.62	-15.82	-95.52	1411.45	747.58

WH1					
δ^+(mm)	V⁺(KN)	δ^-(mm)	V⁻(KN)	E_d(KN-mm)	E_p(KN-mm)
0.45	2.44	-0.44	-2.72	0.42	0.57
0.80	4.35	-0.79	-4.03	1.32	1.66
1.66	8.89	-1.65	-8.00	7.73	6.99
3.00	16.62	-2.99	-15.36	24.63	23.96
4.02	23.02	-4.01	-21.32	39.69	44.49
8.07	49.12	-8.05	-43.90	213.53	187.34
8.08	49.14	-8.05	-43.84	169.52	187.52
8.09	48.95	-8.04	-43.74	154.53	186.93
16.09	98.74	-16.06	-75.13	897.85	698.98
16.10	98.70	-16.07	-77.10	711.84	706.90
16.10	97.71	-16.08	-77.82	666.89	706.07
24.05	141.51	-24.06	-127.43	1656.03	1617.53
24.08	137.74	-24.07	-127.51	1229.56	1596.59
24.09	135.39	-24.07	-127.93	1119.91	1585.23
30.28	167.08	-24.21	-129.40	2858.93	2047.87

WH2					
$\delta^+(\text{mm})$	$V^+(\text{KN})$	$\delta^-(\text{mm})$	$V^-(\text{KN})$	$E_d(\text{KN-mm})$	$E_p(\text{KN-mm})$
0.48	4.41	-0.49	-5.20	1.17	1.17
0.82	7.08	-0.83	-7.93	2.72	3.11
1.68	13.38	-1.68	-13.99	9.24	11.47
3.00	22.27	-3.00	-22.40	26.82	33.49
4.01	27.82	-4.01	-28.20	38.96	56.14
8.00	46.80	-8.01	-51.59	204.17	196.84
8.03	45.54	-8.03	-49.43	135.02	190.62
8.01	44.85	-8.04	-47.70	118.39	185.66
16.02	85.55	-15.96	-83.91	755.08	677.28
16.03	83.90	-16.02	-77.74	548.47	647.62
16.03	82.68	-16.02	-73.95	470.72	627.58
23.99	125.54	-23.90	-107.64	1290.20	1396.18
24.01	122.57	-23.98	-96.59	998.71	1314.74
24.02	121.06	-24.00	-86.93	878.28	1248.54
30.17	146.08	-31.29	-102.47	2571.25	1903.36

WC1					
$\delta^+(\text{mm})$	$V^+(\text{KN})$	$\delta^-(\text{mm})$	$V^-(\text{KN})$	$E_d(\text{KN-mm})$	$E_p(\text{KN-mm})$
0.44	5.31	-0.45	-4.12	0.42	1.05
0.79	9.13	-0.79	-7.64	1.32	3.32
1.66	16.55	-1.64	-15.30	7.73	13.16
3.00	26.71	-2.99	-24.61	24.63	38.44
4.02	33.71	-4.01	-31.33	39.69	65.24
8.02	53.55	-8.04	-58.17	213.53	224.35
8.06	52.36	-8.05	-57.27	169.52	220.83
8.05	52.01	-8.05	-56.64	154.53	218.77
16.10	85.30	-16.08	-100.14	897.85	745.77
16.08	84.16	-16.09	-99.11	711.84	736.88
16.08	82.62	-16.09	-97.90	666.89	725.89
23.99	114.31	-23.87	-138.29	1656.03	1510.61
24.06	110.83	-24.06	-134.99	1229.56	1478.62
24.06	109.11	-24.07	-133.17	1119.91	1457.62
31.84	136.49	-30.63	-164.60	2858.93	2346.84

WC2					
$\delta^+(\text{mm})$	$V^+(\text{KN})$	$\delta^-(\text{mm})$	$V^-(\text{KN})$	$E_d(\text{KN-mm})$	$E_p(\text{KN-mm})$
0.43	2.99	-0.45	-2.75	0.32	0.63
0.78	5.47	-0.79	-5.09	0.89	2.08
1.65	11.50	-1.65	-10.50	3.65	9.07
2.99	19.96	-2.98	-19.05	12.51	29.14
4.01	26.44	-4.01	-25.42	23.22	51.98
8.05	55.42	-8.04	-47.08	168.73	206.23
8.06	55.81	-8.04	-47.66	184.09	208.27
8.06	55.66	-8.06	-47.87	169.03	208.62
16.05	101.55	-16.06	-85.61	773.28	751.41
16.07	99.26	-16.07	-85.04	749.09	740.46
16.07	98.23	-16.09	-84.91	715.34	736.17
24.02	142.08	-24.02	-134.81	1520.92	1662.78
24.04	136.21	-24.07	-133.09	1342.73	1619.46
24.06	132.84	-24.06	-132.29	1237.97	1595.02
29.03	160.12	-27.89	-148.38	3909.07	2196.60

WG1					
$\delta^+(\text{mm})$	$V^+(\text{KN})$	$\delta^-(\text{mm})$	$V^-(\text{KN})$	$E_d(\text{KN-mm})$	$E_p(\text{KN-mm})$
0.49	3.39	-0.49	-3.19	0.71	0.80
0.83	5.52	-0.82	-4.65	1.76	2.10
1.68	9.99	-1.67	-8.07	6.37	7.57
3.01	15.59	-3.00	-13.78	17.42	22.06
4.01	20.39	-4.01	-18.30	26.39	38.80
8.02	42.90	-8.02	-40.98	106.55	168.15
8.02	43.51	-8.03	-39.33	81.54	166.30
8.03	43.69	-8.04	-38.39	74.21	164.87
16.02	87.06	-15.86	-84.05	656.72	681.86
16.03	85.92	-15.98	-73.51	475.66	637.86
16.03	85.38	-16.01	-66.59	387.97	608.68
23.93	128.85	-23.85	-102.89	1337.97	1384.24
24.01	123.46	-23.96	-88.31	1009.42	1269.88
24.02	120.59	-23.96	-77.52	850.47	1188.61
30.40	147.45	-30.74	-99.58	3626.49	1885.89

WG2					
δ^+(mm)	V⁺(KN)	δ^-(mm)	V⁻(KN)	E_d(KN-mm)	E_p(KN-mm)
0.48	3.55	-0.47	-5.15	0.68	1.04
0.84	5.68	-0.82	-7.87	1.52	2.81
1.68	11.85	-1.68	-14.88	6.26	11.21
3.00	22.89	-3.01	-25.40	19.18	36.27
4.01	31.25	-4.01	-33.35	32.37	64.82
8.01	55.24	-8.02	-65.69	216.84	242.32
8.02	54.28	-8.03	-64.86	169.46	238.97
8.02	53.85	-8.03	-64.25	151.77	237.00
16.01	101.19	-15.97	-116.39	867.35	869.83
16.03	98.68	-16.01	-113.86	716.08	851.38
16.03	97.58	-16.02	-112.29	658.21	840.97
23.87	148.00	-22.62	-137.42	2726.17	1660.21

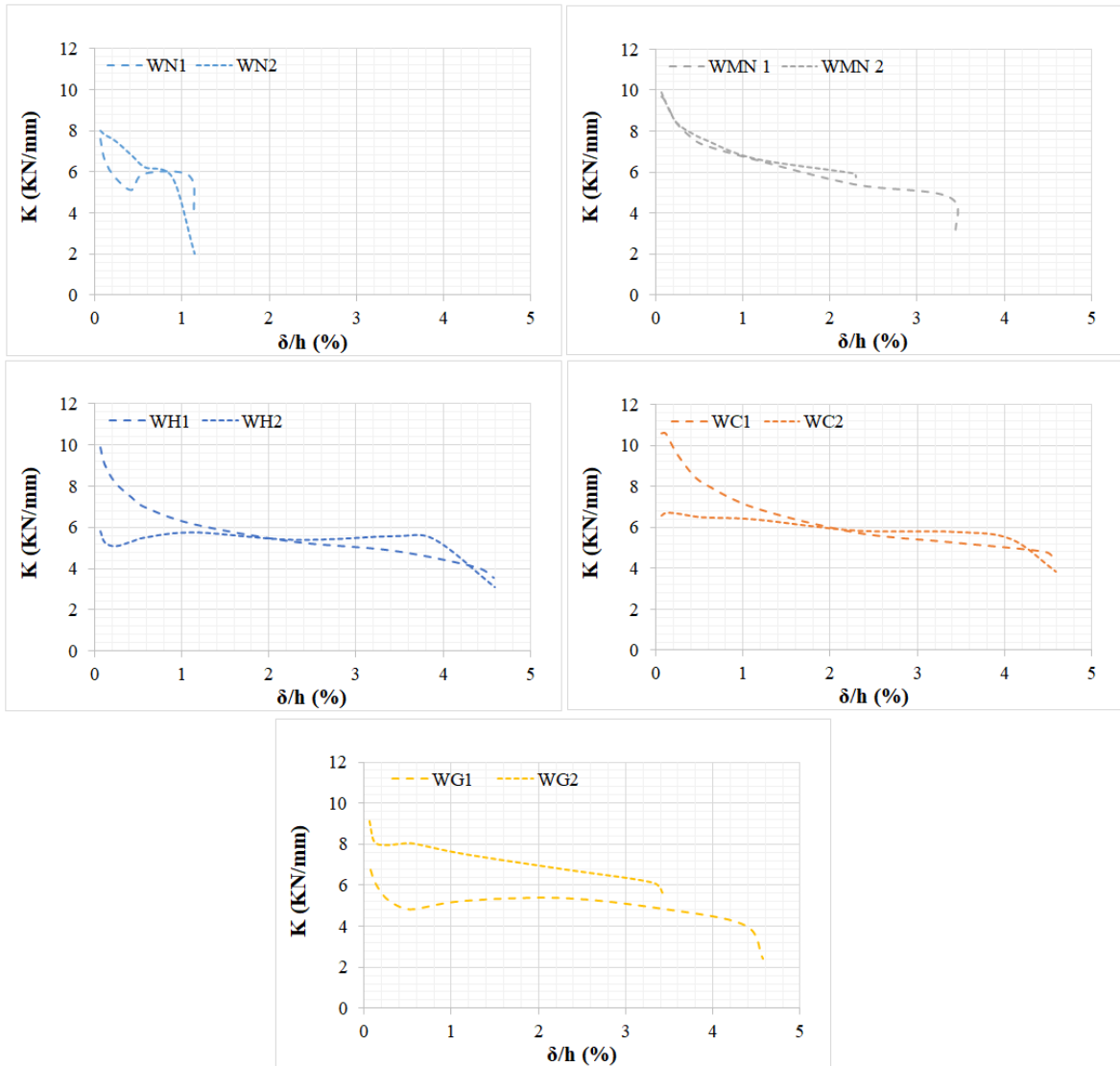


Figura B. 11. Degradación de rigidez

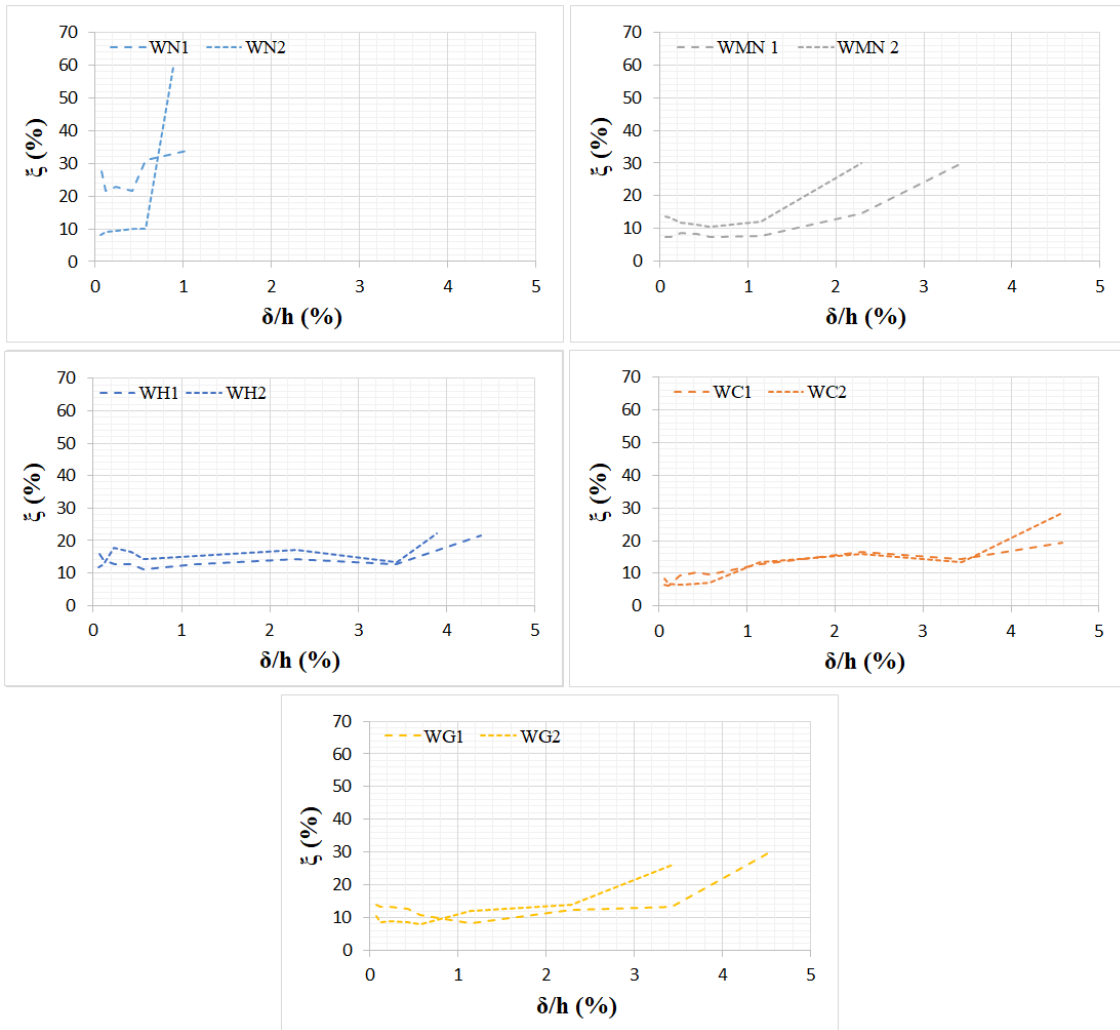


Figura B.12. Factor de amortiguamiento

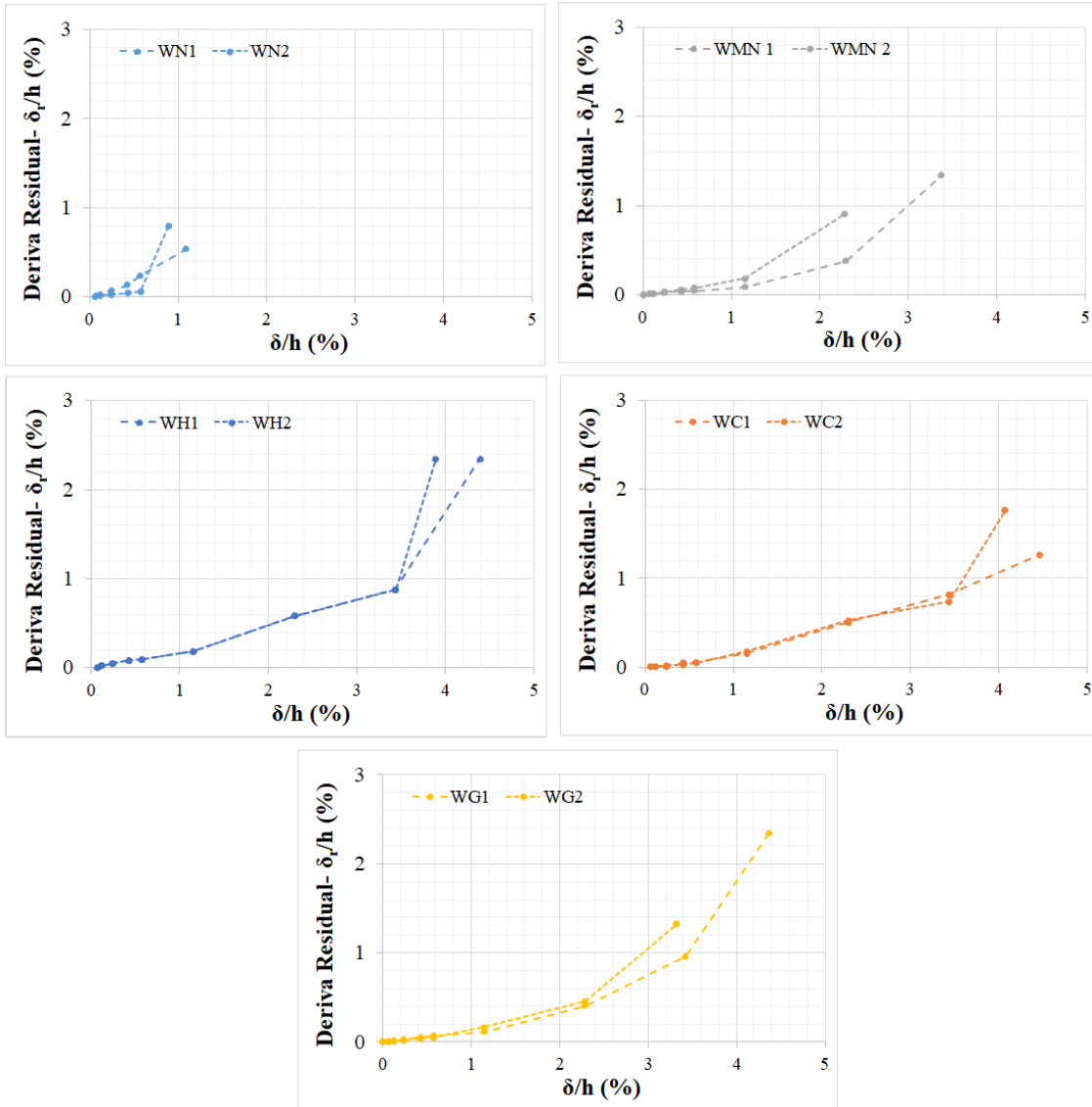


Figura B. 13. Deriva residual

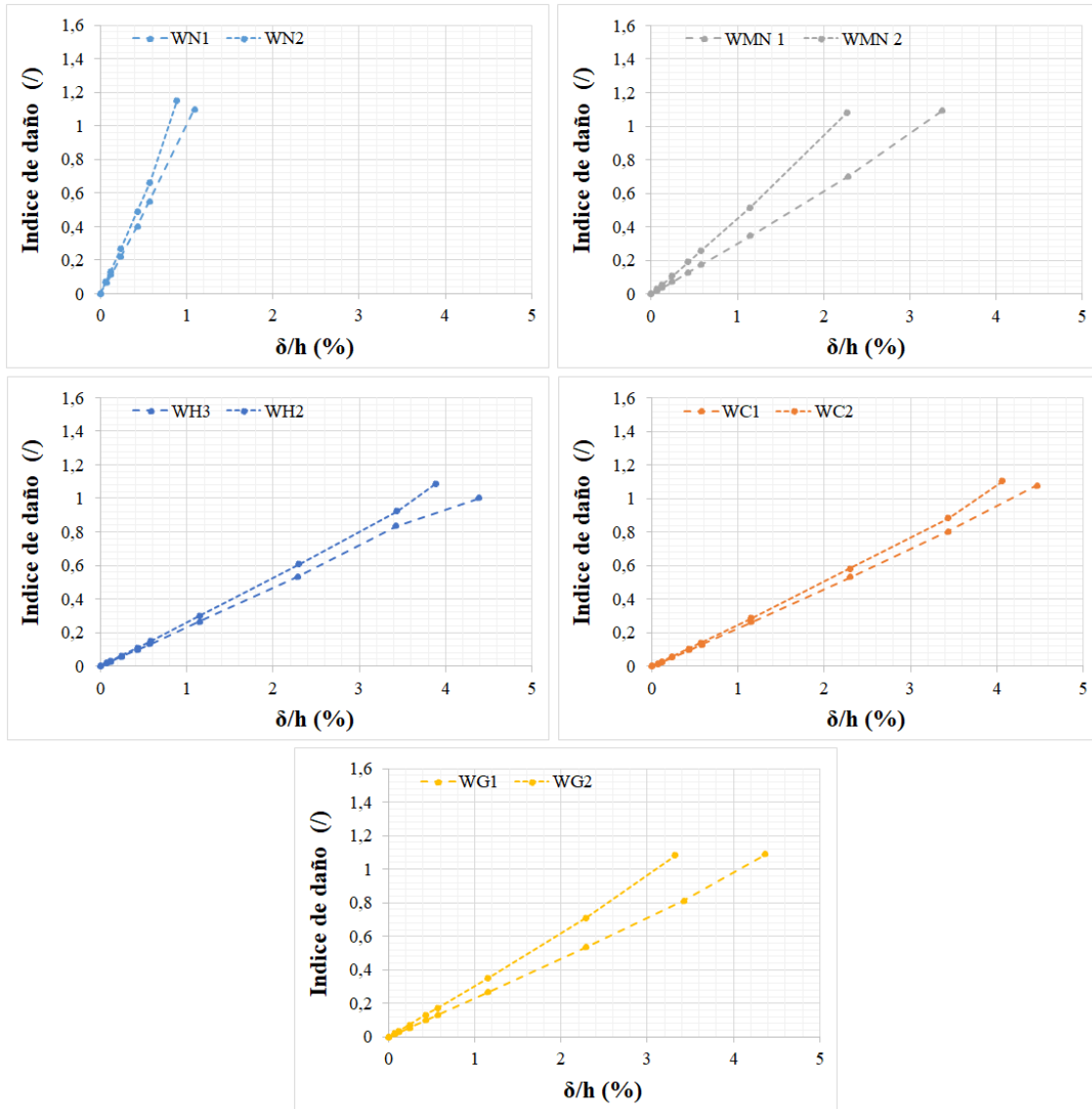


Figura B.14. Índice de daño

Anexo C. Datos analíticos y numéricos de FRCM y muros sometidos a carga cíclicas.

C.1. Introducción

Este anexo es presentado con el objetivo de presentar los cálculos y datos que no fueron presentados en los capítulos correspondiente a los modelos analíticos (capítulo 6) y numérico (capítulo 7). En este se presentan los datos resultantes de cada tipo de espécimen de FRCM y muros, y también las imágenes de los modelos numéricos que no fueron incluidas en el capítulo 7.

C.2. Modelo analítico

En las Tabla C.1 y C.2 se muestran todos los valores de los parámetros calculados en los modelos analíticos del FRCM a tracción para cada tipo de fibra. En esta se presentan los resultados para cada uno de los modelos utilizados (Modelo ACK, ajustado 1, y ajustado 2).

Tabla C.1. Cálculos del modelo ACK

Modelo ACK				
	Cáñamo	Lino	Sisal	Algodón
E_f (MPa)	38.74	36.01	4.87	0.93
V_f (/)	0.01	0.01	0.08	0.07
V_m (/)	0.99	0.99	0.92	0.93
E_m (GPa)	8.92	8.92	8.92	8.92
σ_m (MPa)	4.61	4.61	4.61	4.61
σ_{cm} (MPa)	4.82	4.80	4.45	4.33
E_{tl} (GPa)	9.32	9.29	8.60	8.39

ϵ_I (%)	0.05	0.05	0.05	0.05
α_e (l)	16.73	18.00	21.57	134.38
ϵ_{II} (%)	0.63	0.67	0.79	4.68
E_{III} (GPa)	0.53	0.49	0.38	0.06
$\sigma_{c,u}$ (MPa)	520.76	630.83	111.45	91.95
A_m (mm ²)	6.28	6.28	39.25	28.26
$F_{c,u}$ (N)	3270.37	3961.61	4374.41	2598.51
ϵ_{III} (%)	0.95	1.31	1.92	6.07

Tabla C. 2. Cálculos de modelos ajustados

	Modelo ajustado 1				Modelo Ajustado 2	
	Cáñamo	Lino	Sisal	Algodón	Sisal	Algodón
E_f (GPa)	38.74	36.01	4.87	0.93	4.87	0.93
V_f (l)	0.01	0.01	0.08	0.07	0.08	0.07
E_m (GPa)	8.92	8.92	8.92	8.92	8.92	8.92
V_m (l)	0.99	0.99	0.92	0.93	0.92	0.93
σ_m (MPa)	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61
σ_{cm} (MPa)	4.82	4.80	4.45	4.33	3.33	3.25
ϵ_I (%)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
n (l)	4.34	4.04	0.55	0.10	0.55	0.10
p (l)	0.01	0.01	0.08	0.06	0.08	0.06
ϵ_{sr} (%)	0.01	0.01	0.01	0.09	0.01	0.09
ϵ_{II} (%)	0.80	1.16	1.59	4.65	1.07	1.10
E_{II} (MPa)	9.32	9.29	8.60	8.39	8.60	8.39
E_{fvf} (Gpa)	0.53	0.49	0.38	0.06	0.38	0.06
$\sigma_{c,u}$ (MPa)	520.76	630.83	111.45	91.95	111.45	91.95
A_m (mm ²)	6.28	6.28	39.25	28.26	39.25	28.26
$F_{c,u}$ (N)	3270.37	3961.61	4374.41	2598.51	4374.41	2598.51
ϵ_{III} (%)	1.24	1.62	2.30	8.39	2.30	8.39
E_{III} (GPa)	0.39	0.68	0.61	0.02	0.44	0.03

C.3. Modelo numérico

Para los análisis numéricos presentados en esta tesis se utilizó un computador con procesador Intel Core i5 de 3.2GHz con 6 GB de memoria RAM. Todas las simulaciones fueron realizadas con el programa de análisis estructural Abaqus. La duración de análisis para los especímenes de FRCM fue de aproximadamente 2 minutos para cada tipo de FRCM, de 13 minutos para los muros sin reforzar, y de aproximadamente 3 horas para los muros reforzados con FRCM.

C3.1. FRCM

En la Figura C.1 se muestran las condiciones de contorno del FRCM, y en la Figura C.2 se muestran los estados tensionales de las mallas al momento del fallo. Este estado tensional se tomó como criterio de fallo de los especímenes de FRCM presentados en el capítulo 7.

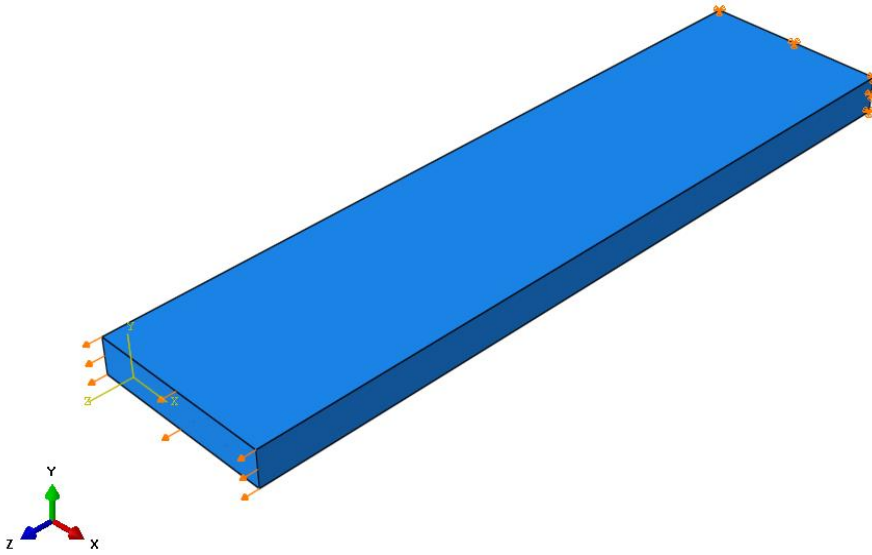


Figura C.1. Condiciones de contorno del FRCM

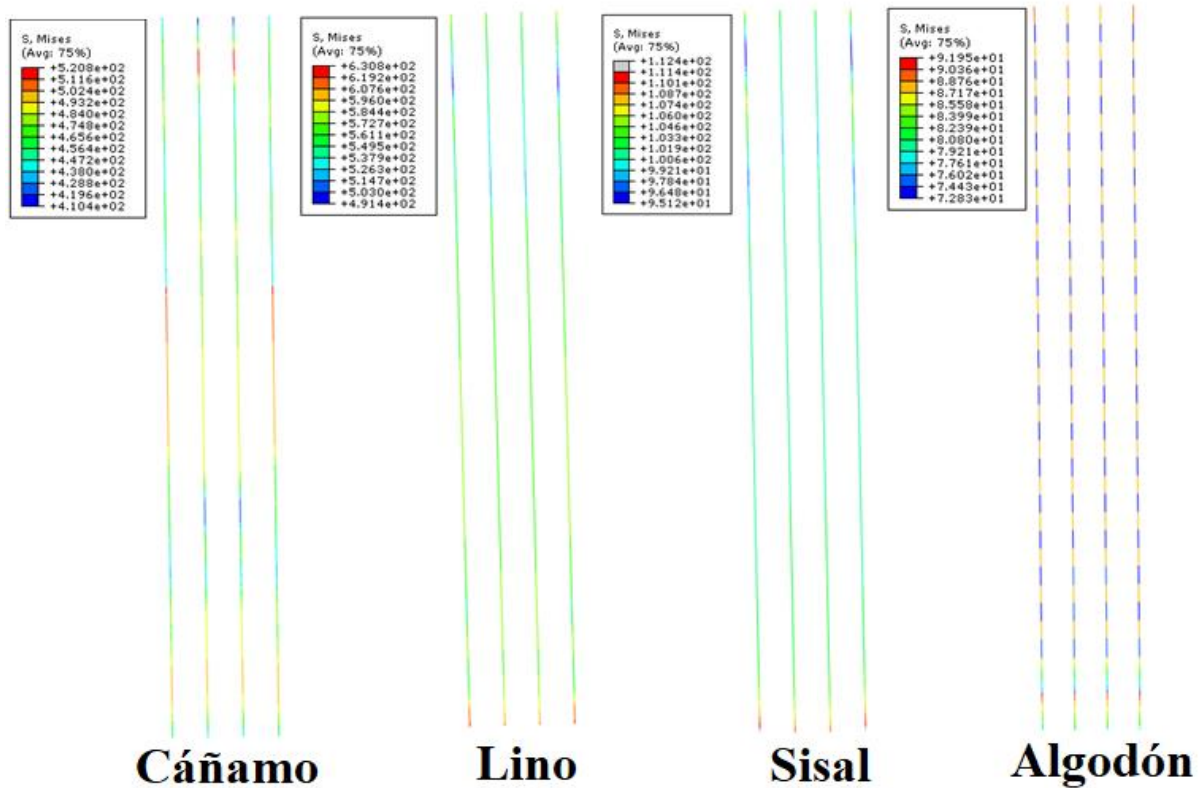


Figura C.2. Estados tensionales de las mallas del FRCC al momento del fallo

C3.2. Muros sometidos a cargas cíclicas

En la Figura C. 3 se muestran las condiciones de contorno de los muros sometidos a cargas cíclica. Por otro lado en la Tabla C. 3 se presentan los datos de cortante máximos (V) en ambas direcciones de carga de cada ciclo, junto con estas se presentan sus respectivos desplazamiento (δ), la energía disipada (E_d) y aplicada (E_p) por ciclo, el valor equivalente al 75% del cortante máximo y el desplazamiento en este punto (δ_c), y así también el desplazamiento efectivo (δ_e) correspondiente a la extrapolación del estado límite de fisuración. Estos fueron los valores utilizados la elaborar las curvas bilineales, la curva de degradación de rigidez, la curva de amortiguamiento y el diagrama de índice de daño, presentados en el capítulo 7.

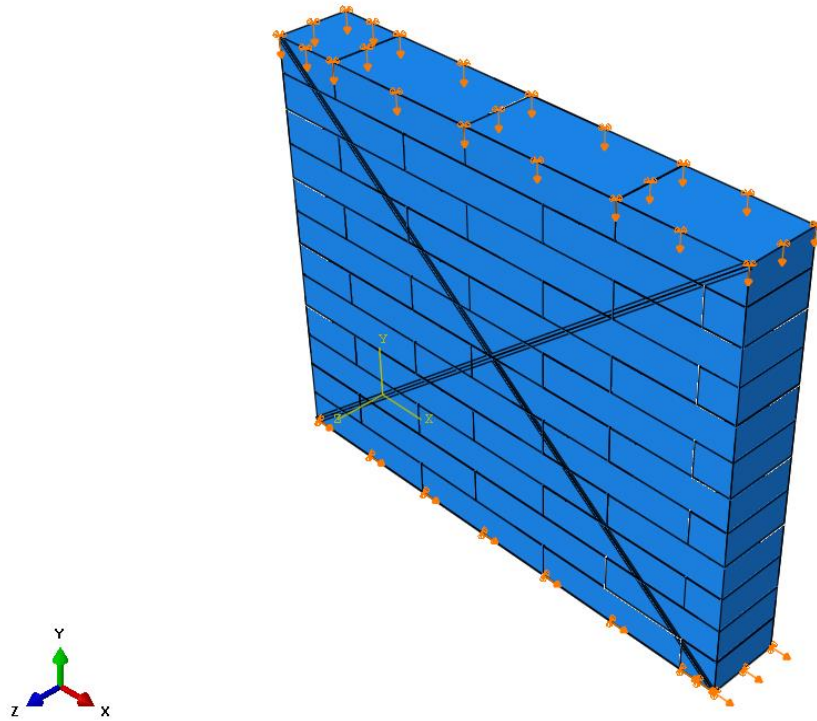


Figura C. 3. Condiciones de contorno de muros sometidos a cargas cíclicas

Tabla C. 3. Cortante máximo por ciclos de cargas

WN								
δ^+ (mm)	V^+ (KN)	δ^- (mm)	V^- (KN)	E_d (KN-mm)	E_p (KN-mm)	$0.75V_{max}$ (KN)	δ_c (mm)	δ_e (mm)
0.43	0.75	-0.29	-1.15	0.24	0.16	31.56	2.76	3.61
0.82	4.80	-0.81	-7.33	0.70	2.47			
1.71	17.36	-1.84	-20.28	5.73	16.75			
2.51	28.09	-3.00	-33.92	2.48	43.02			
3.89	40.13	-3.92	-40.18	61.16	78.42			
6.97	40.95	-6.33	-41.31	484.07	136.72			

WH								
δ^+ (mm)	V^+ (KN)	δ^- (mm)	V^- (KN)	E_d (KN-mm)	E_p (KN-mm)	$0.75V_{max}$ (KN)	δ_c (mm)	δ_e (mm)
0.46	11.07	-0.37	3.05	0.07	1.55	100.11	14.60	19.79
0.86	15.48	-0.97	-5.60	0.22	4.68			
1.61	25.53	-1.54	-16.66	0.99	16.70			

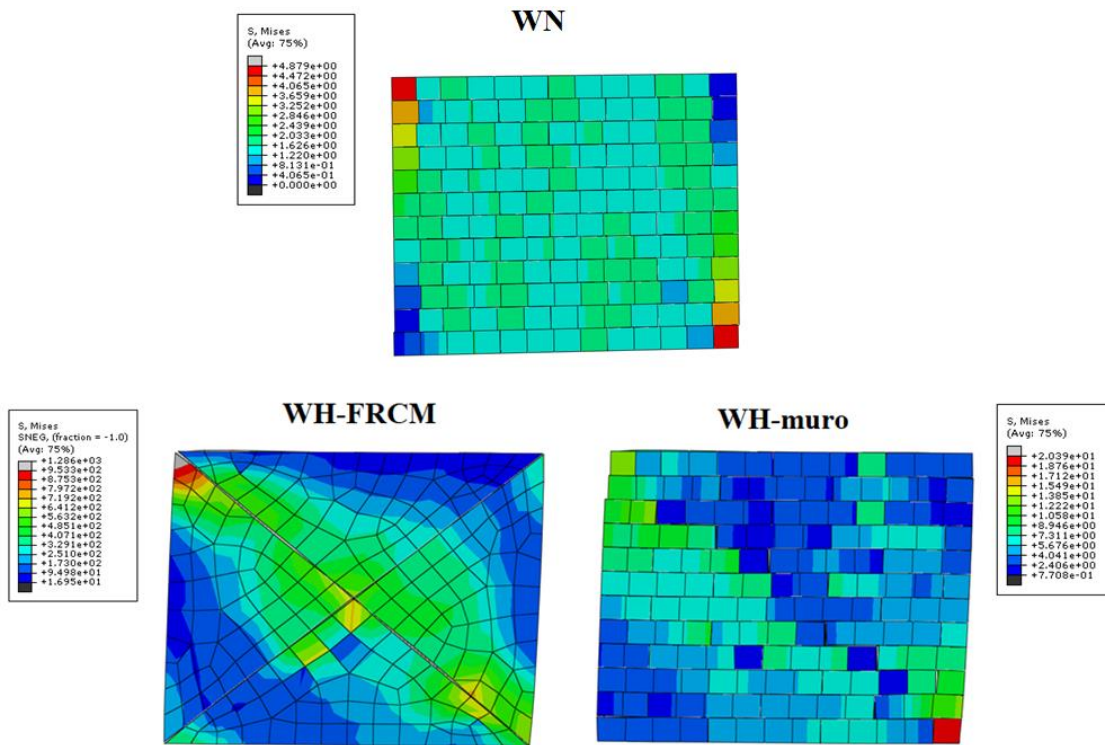
2.73	40.78	-2.84	-36.56	14.26	53.87			
3.95	52.81	-3.88	-46.26	61.51	97.08			
7.29	72.10	-7.91	-71.68	388.09	273.09			
7.85	74.54	-7.89	-71.73	403.04	287.68			
7.79	73.61	-7.68	-70.86	371.65	279.55			
15.64	103.05	-15.53	-98.08	1553.78	783.46			
15.45	99.37	-15.52	-99.51	1404.19	769.90			
14.64	97.67	-15.83	-99.74	1247.04	752.17			
23.70	119.50	-23.92	-124.83	2902.15	1454.47			
23.67	120.15	-23.20	-119.97	2588.52	1406.92			
23.95	120.08	-23.60	-123.45	2482.09	1447.35			
28.80	132.06	-28.56	-135.71	3490.20	1919.90			

WC								
δ^+ (mm)	V ⁺ (KN)	δ^- (mm)	V ⁻ (KN)	E _d (KN-mm)	E _p (KN-mm)	0.75V _{max} (KN)	δ_c (mm)	δ_e (mm)
0.43	11.01	-0.40	3.18	0.12	1.51	105.70	18.21	24.59
0.92	16.18	-0.95	-4.45	0.66	4.78			
1.55	24.59	-1.92	-21.55	3.64	19.86			
2.86	41.67	-2.98	-37.05	23.82	57.38			
3.89	51.31	-3.70	-43.97	60.62	90.59			
7.46	71.37	-7.89	-69.51	402.11	270.25			
7.59	70.98	-7.78	-69.42	384.44	269.77			
7.67	70.74	-7.76	-69.20	388.93	270.00			
15.44	98.01	-15.72	-96.58	1564.16	757.99			
15.78	99.25	-15.76	-95.59	1442.09	768.06			
15.42	96.98	-15.95	-95.96	1334.29	756.61			
22.88	110.81	-23.31	-114.53	2825.76	1301.39			
23.70	116.57	-24.18	-118.62	2725.25	1407.52			
22.23	112.36	-24.14	-118.27	2467.95	1338.16			
34.76	140.49	-35.01	-142.73	5150.81	2470.12			

WG								
δ^+ (mm)	V ⁺ (KN)	δ^- (mm)	V ⁻ (KN)	E _d (KN-mm)	E _p (KN-mm)	0.75V _{max} (KN)	δ_c (mm)	δ_e (mm)
0.46	11.09	-0.38	2.96	0.46	1.55	99.38	14.32	19.43
0.38	10.38	-1.21	-9.76	0.84	3.94			
2.78	41.48	-2.77	-35.53	15.48	53.42			

3.67	50.50	-3.89	-46.26	56.62	91.29			
7.68	74.41	-7.89	-71.39	408.58	283.66			
7.94	74.78	-7.74	-70.89	400.93	285.68			
7.75	72.97	-7.67	-70.92	372.94	277.50			
15.87	103.31	-15.40	-99.90	1553.61	794.42			
15.56	100.35	-15.98	-100.95	1428.17	793.67			
15.59	100.68	-15.59	-98.67	1317.02	777.06			
23.78	121.72	-23.50	-121.80	2859.59	1439.33			
23.47	118.17	-22.94	-117.70	2566.78	1368.36			
23.90	119.53	-23.94	-123.82	2514.88	1455.14			
27.45	128.89	-27.82	-134.82	3259.36	1821.93			

En la Figura C.4 se muestran los estados tensionales al momentos fallo de todos los modelos de los muros sometidos a cargas ciclicas. En estas se muestra como el FRCM mas tensionado es el de cañamo, seguido por el de vidrio y el de algodón. Esto a pesar de que a los muros reforzados con FRCM de algodón se le impuso un mayor desplazamiento de fallo (ver capitulo 7).



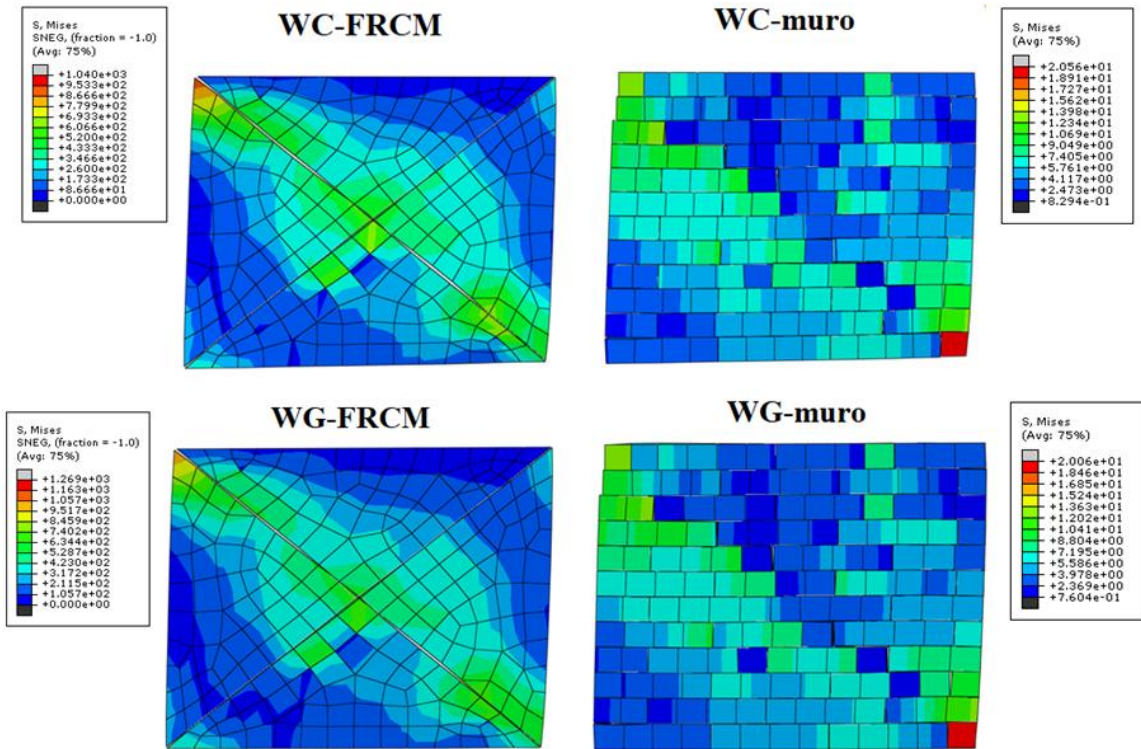


Figura C.4. Estados tensionales de muros y FRCM