

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



Resistencia a la tensión del sistema FRCC: malla polimérica embebida en matriz cementicia

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presentan los bachilleres:

Jesús Ramírez Guillermo

Jhoseph Cueva Arias

Asesor: Mg. Daniel Enrique Torrealva Dávila

Lima, marzo del 2020

RESUMEN

Lo observado luego de sismos y los resultados de investigación han demostrado que los muros de albañilería sin refuerzo presentan importantes limitaciones ante las acciones sísmicas debido a su poca resistencia a la tracción y su comportamiento frágil luego del agrietamiento (San Bartolomé et al 2011). En respuesta al problema de la alta vulnerabilidad, y en cumplimiento con la Ley N°30191 el estado viene otorgando bonos de Protección de Viviendas Vulnerables a los Riesgos Sísmicos, mediante los cuales se trata de crear ambientes seguros dentro de las viviendas existentes con refuerzo de algún tipo.

Uno de los métodos más modernos es el refuerzo superficial con sistemas FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix), la cual consta de una fibra embebida en una matriz cementicia. El sistema FRCM es muy atractivo debido a su reforzamiento no invasivo y a su fácil instalación. En este estudio se caracterizó y se describió el comportamiento de este refuerzo sometido a los ensayos de tracción acorde a los criterios de aceptación planteados por el documento AC434 (2016). La matriz cementicia que se uso es el mortero común para tarrajeo y como refuerzo la geomalla.

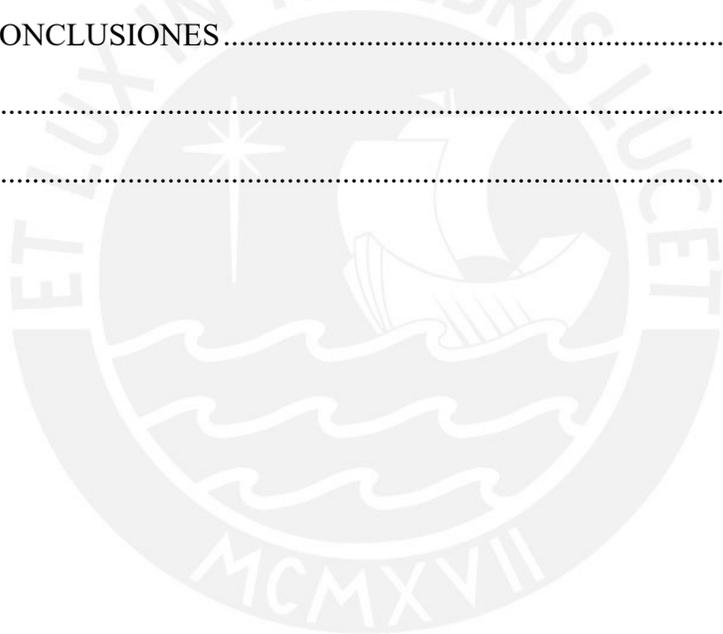
En esta investigación se ensayaron a tracción 22 muestras del sistema FRCM (11 con geomallas continuas y 11 traslapadas), y se obtuvo los principales valores de su comportamiento mecánico, tales como: deformación última, punto de transición, esfuerzo último, etc. Con dichos valores se analizará y construirá la curva característica del sistema según los criterios del AC434 y ACI 549.4R-13. Además, se realizaron ensayos en los materiales componentes para verificar su calidad.

En la investigación, se encontró que el sistema FRCM compuesto por una malla polimérica y una matriz cementicia de tipo tarrajeo presenta un comportamiento altamente complejo. Este comportamiento no permitió realizar un análisis directo en el comportamiento mecánico de los materiales individualmente y el sistema. Sin embargo, también se pudo observar la gran capacidad del sistema para liberar energía mediante fisuras bien distribuidas. Esto aumenta la ductilidad del elemento reforzado, evitando el colapso del elemento frente a eventos sísmicos.

ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
ÍNDICE.....	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE GRÁFICOS.....	ix
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento y justificación del problema.....	1
1.2. Alcance	2
1.3. Antecedentes.....	3
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivos.....	6
1.6. Metodología.....	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	8
2.1. Sistema FRCC.....	8
2.1.1. Propiedades Mecánicas	9
2.1.2. Estudios experimentales en muros de albañilería.....	12
2.2. Marco Normativo.....	14
2.2.1. ACI 549.4R-13	14
2.2.2. Código Internacional AC434.....	15
2.2.3. Norma E.070.....	17
CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	19
3.1. Mortero (Matriz Cementicia).....	19
3.1.1. Ensayo de Control ASTM C-579	20
3.2. Malla Polimérica (Geomalla).....	25

3.2.1. Ensayo de Control ASTM C-579	26
CAPÍTULO 4: PREPARACIÓN Y DISEÑO DEL ENSAYO A TRACCIÓN DE LOS ESPECIMENES FRCM	30
4.1. Predimensionamiento de los especímenes	30
4.2. Proceso constructivo de los especímenes	32
4.3. Instrumentación y Procedimiento del Ensayo a Tracción.....	36
CAPÍTULO 5: ANALISIS DE RESULTADOS.....	42
5.1. Resultados del Ensayo a Tracción	42
5.2. Análisis de los resultados y construcción de la curva bilineal.....	46
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	59
ANEXO A	61
REFERENCIAS	62



LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Procedimiento de la instalación del sistema FRP:(a) colocación de la primera capa de resina; (b) instalación de la fibra;(c) aplicación de la segunda capa de resina (Fuente: San Bartolomé,2011).....	3
Figura 2-Diferentes tipos de fibras poliméricas:(a) polipropileno; (b) polietileno; (c) alcohol de polivinilo(Fuente: ACI 549.4R-13,2013).....	4
Figura 3-Reforzamiento de un muro de mampostería con mallas poliméricas (Fuente: Sofronie,2005).....	5
Figura 4-Sistema FRCM: malla embebida en matriz cementicia.....	8
Figura 5- Uso del sistema FRCM en un domo de una antigua iglesia en Grecia (Fuente: ACI 549.4R-13).....	9
Figura 6- Esfuerzos debidos a la fricción y trabazón de la geomalla (Fuente: Koerner,2012)	10
Figura 7- Esfuerzo vs deformación del sistema FRCM (Fuente: Weiland,2007)	11
Figura 8- Mecanismo de transferencia de esfuerzos alrededor de los nudos (Fuente: Sofronie,2005)	12
Figura 9-Patrón de formación de grietas: (a) un muro de albañilería sin refuerzo; (b)muro de albañilería con refuerzo FRCM (Fuente: Torrealva y Dusi, 2007)	13
Figura 10- Absorción y disipación de energía : (a) muro de albañilería sin refuerzo; (b)muro de albañilería con refuerzo FRCM (Fuente: Torrealva y Dusi, 2007)	13
Figura 11-Molde cubierto con desmoldante para la preparación de los cubitos.....	20
Figura 12- Llenado del molde previo al enrase	21
Figura 13- Retiro de los cubitos del molde después de 24 horas.	21

Figura 14-Ensayo de compresión del cubito de mortero.....	22
Figura 15-Proceso de fabricación de las geomallas (Fuente: Koerner,2012).....	25
Figura 16- Geomalla biaxial a usar para el sistema de reforzamiento FRCM.....	26
Figura 17-Ensayo a tracción de una costilla de la geomalla.....	27
Figura 18- Esquema de las dimensiones:(a) Espécimen FRCM; (b) Lengüeta de metal (Fuente: AC434,2016)	31
Figura 19-Plancha típica de geomalla para los paneles.....	33
Figura 20-Preparación del Marco :(a) geomalla centrada entre los dos listones;(b)acabado final de los paneles.....	33
Figura 21- Colocación de daditos o cuñas de madera debajo de la geomalla	34
Figura 22-Vaciado y curado de los paneles : (a) vaciado del mortero ;(b) fraguado inicial ;(c) curado del panel con yute.....	35
Figura 23- Corte de los paneles en piezas rectangulares.....	35
Figura 24-Pegado de las lengüetas de acero en los especímenes.	36
Figura 25- Esquema de la disposición del ensayo a tensión de l sistema FRCM. (Fuente: Montesi 2015)	37
Figura 26- Modelo de sujetador tipo grillete. (Fuente: AC434 2016).....	38
Figura 27 - Espécimen alineado en la dirección de la carga	40
Figura 28-Ensayo a Tracción del Sistema FRCM:(a)malla continua;(b)malla traslapada.....	42
Figura 29-Modos de falla del sistema FRCM (geomalla y mortero): resistencia última a tracción de la geomalla;(b) desprendimiento del mortero.....	46

Figura 30-Desarrollo de múltiples fisuras durante el ensayo a tracción del sistema FRCM	47
Figura 31- Curva Esfuerzo vs Deformación del espécimen C10	47
Figura 32-Fisuramiento del espécimen ensayado:(a) estado inicial-elástico; (b) primera fisura;(c) segunda fisura; (d) tercera fisura; (e) cuarta fisura ; (f) quinta fisura;(g) rotura final.....	49
Figura 33-Curva de esfuerzo vs deformación teórica (Fuente: Mechtcherine 2013).....	50
Figura 34-Curva de esfuerzo vs deformación del ensayo a tracción del sistema FRCM (geomalla y mortero) :(a) división en 3 zonas según Mechtecherine (2013); (b) división en 2 zonas según su comportamiento.....	51
Figura 35- Ensayo a tracción :(a) esfuerzo vs deformación;(b) espécimen ensayada.....	52
Figura 36-Esfuerzo vs deformación unitaria	53
Figura 37-Fisura atípica a lo esperado debido a la excentricidad de la carga tensión aplicada.....	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características del mortero a usar.....	19
Tabla 2 Número de especímenes para cada tipo de mortero a ensayar.....	20
Tabla 3 Resultados y cálculos de especímenes ensayados a compresión.	23
Tabla 4 Resultados del ensayo a tensión de los especímenes.....	28
Tabla 5 Número de especímenes para cada tipo de ensayo.....	30
Tabla 6 Dimensiones de los especímenes de sistema FRCM.....	32
Tabla 7 Dimensiones de las lengüetas en cada tipo de ensayo.....	32
Tabla 8 Resultados del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla continua.....	43
Tabla 9 Resultados del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla traslapada.	43
Tabla 10 Resultados y cálculos del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla continua.	44
Tabla 11 Resultados y cálculos del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla traslapada.....	45
Tabla 12 Valores del módulo de elasticidad.....	55
Tabla 13 Valores estadísticos de los Módulos de Elasticidad.....	56
Tabla 14 Valores del Módulos de Elasticidad para la geomalla.....	57
Tabla 15 Características de la curva bilineal.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Fuerza (kN) vs Deformación (mm) de los especímenes	24
Gráfico 2 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria(mm/mm) de los especímenes	24
Gráfico 3 Fuerza (kN) vs Deformación (mm) de los especímenes	28
Gráfico 4 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de los especímenes.	29
Gráfico 5 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de especímenes FRCM con malla continua.	44
Gráfico 6 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de especímenes FRCM con malla traslapada.	45
Gráfico 7 Deformación unitaria de la geomalla y los especímenes C09,C010 y C11	52
Gráfico 8 Zona Elástica de los especímenes ensayados	54
Gráfico 9 Zona Elástica de los especímenes con regresión lineal	55
Gráfico 10 Curvas representativas de los Módulos de Elasticidad	56
Gráfico 11 Curva bilineal representativo.....	57
Gráfico 12 Curva bilineal de los 11 especímenes.....	58

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1.Planteamiento y justificación del problema

El crecimiento poblacional en Lima en los últimos decenios ha generado una expansión urbana desorganizada, en donde las viviendas de ladrillo vienen siendo las de mayor incremento (Salinas 2007). La fácil construcción y, sobre todo, la flexibilidad económica de las estructuras de ladrillo ha hecho que muchas familias las escojan, sin embargo, muchas de estas viviendas han sido construidas sin un adecuado diseño ni supervisión (La Republica 2013). En vista del uso extensivo de las estructuras de ladrillo, es necesario estudiar el comportamiento de estas viviendas, principalmente, frente a eventos sísmicos.

Lo observado luego de sismos y los resultados de investigación han demostrado que los muros de albañilería sin refuerzo presentan importantes limitaciones ante las acciones sísmicas debido a su poca resistencia a la tracción y su comportamiento frágil luego del agrietamiento (San Bartolomé et al 2011). Entonces, debido a su alta vulnerabilidad ante eventos sísmicos los sistemas de albañilería simple o no reforzada han sido prohibidos por la Norma Técnica E.070. La norma NTP E.070 también propone el confinamiento del muro de albañilería mediante vigas y columnas para dotar al sistema de una mayor capacidad de deformación inelástica y arriostrar al muro de albañilería cuando tenga que resistir fuerzas fuera de su plano. Sin embargo, el elevado costo de los materiales de construcción para producir concreto y la necesidad de mano de obra calificada hacen optar al consumidor por sistemas informales como la albañilería simple. En consecuencia, se tiene una ciudad con viviendas altamente vulnerables ante un evento sísmico de gran magnitud.

En respuesta al problema de la alta vulnerabilidad, y en cumplimiento con la Ley N°30191 el estado viene otorgando bonos de Protección de Viviendas Vulnerables a los Riesgos Sísmicos, mediante los cuales se trata de crear ambientes seguros dentro de las viviendas existentes con refuerzo de algún tipo. La práctica más usada para el reforzamiento de dichas casas es la colocación de nuevas columnas y vigas que confinen a los muros de la vivienda. Sin embargo, el procedimiento para confinar los muros existentes es complicado y riesgoso, ya que implica demoler áreas específicas de la casa

para la colocación de las vigas y columnas. En este sentido, los sistemas de refuerzo superficial son una opción más segura, menos costosa y menos invasiva.

Ensayos realizados en muros de albañilería han evidenciado que existe un mejor comportamiento estructural cuando el muro posee reforzamiento superficial tipo tarrajeo. Además, el uso de mallas poliméricas embebidas en el tarrajeo permite un mayor control de la propagación de fisuras y un aumento significativo de la resistencia. Sin embargo, es necesario estudiar y caracterizar la resistencia y el comportamiento de este tipo de refuerzo con materiales locales del mercado. Además, se deberá adoptar los criterios de aceptación planteados por el documento AC434 (2016) para garantizar su eficacia y resiliencia.

1.2. Alcance

En las últimas décadas el uso de sistemas de reforzamiento superficial con materiales compuestos ha tenido gran aceptación. En la literatura se puede evidenciar su evolución a través del tiempo, siendo los más recientes los sistemas FRP (Fiber Reinforced Polymer) y FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix).

Las ventajas que posee el sistema FRCM respecto al FRP ha incrementado el interés por la investigación de este sistema. Las investigaciones se realizaron variando los materiales y componentes cumpliendo la única condición de que exista una fibra de reforzamiento y una matriz. Por esta razón, el International Code Council pone a disposición el AC434 como criterio de evaluación para la aceptación de sistemas FRCM.

Uno de los principales criterios de aceptación es el ensayo a tracción del sistema FRCM, el cual será la finalidad del presente estudio. Esta investigación estudiará el sistema compuesto FRCM conformado por una capa de geomalla embebida en mortero tradicional para tarrajeo usado comúnmente en Perú.

Para esto se ensayarán a tracción 22 muestras del sistema FRCM (11 con geomallas continuas y 11 traslapadas) con el objetivo de obtener una descripción y análisis de su comportamiento mecánico, tales como: deformación última, punto de transición, esfuerzo último, etc. Con dichos valores se tratará de construir la curva característica del sistema según las recomendaciones y criterios del AC434 y ACI 549.4R-13.

1.3. Antecedentes

El primer acercamiento al uso de reforzamiento en muros de albañilería se dio en el año 1755 debido a los daños causados por el sismo en Portugal ese año, y alcanzó mayor desarrollo en los años posteriores al terremoto de San Francisco en 1906 (Tobriner, 1984). Sin embargo, la mayoría de los sistemas de reforzamiento comprometían a la estructura existente debido a la necesidad de realizar demoliciones o perforaciones, por lo cual su aplicación en monumentos históricos, santuarios, catedrales, etc. era inviable. Ante esta situación, en los años setenta surgieron los sistemas de reforzamiento superficial, por ejemplo, el compuesto por mortero y malla de acero. No obstante, este método fue criticado debido a sus limitaciones en eficiencia y durabilidad.

En años posteriores se desarrolló un nuevo tipo de reforzamiento superficial llamado *Fiber Reinforced Polymers* (FRP), buscando cubrir las desventajas de sistemas anteriores. El sistema FRP está compuesto por un polímero (resina) reforzado con fibras en una o varias direcciones (ver Figura 1) las cuales otorgan la resistencia mecánica necesaria (Cuadros y Orozco, 2007). Estas fibras pueden ser de carbono, vidrio o aramida, y son saturadas en una matriz polimérica a base de epóxico.



(a)

(b)

(c)

Figura 1- Procedimiento de la instalación del sistema FRP: (a) colocación de la primera capa de resina; (b) instalación de la fibra; (c) aplicación de la segunda capa de resina (Fuente: San Bartolomé, 2011)

Sin embargo, el sistema FRP presentó algunos inconvenientes atribuidos principalmente al uso de la resina, tales como: (a) comportamiento deficiente de la resina a temperaturas por encima de su temperatura de vitrificación; (b) costo elevado del epóxico; (c) dificultad para aplicar el sistema FRP en superficies con temperaturas bajas o húmedas; (d) falta de permeabilidad al vapor e incompatibilidad de la resina con ciertos

sustratos; y (e) dificultad para realizar una evaluación post-sismo al muro reforzado con el sistema FRP .

Para solucionar los problemas del sistema FRP se planteó reemplazar el material aglutinante orgánico (resina) por uno inorgánico, como el mortero (Papanicolaou et al.,2007). Pero este cambio no aseguraba el correcto funcionamiento de las fibras, ya que las fibras de vidrio se deterioraban debido a la naturaleza alcalina de la base cementicia. De acuerdo con las indicaciones del ACI 549.2R-04 se pueden realizar modificaciones químicas al mortero para lograr que la fibra de vidrio resista la alcalinidad del cemento, sin embargo, esta medida eleva el costo del sistema llegando a ser similar a si se usara fibra de carbono. Esta situación se podría mejorar con el uso de telas hechas de polipropileno, polietileno, alcohol de polivinilo, etc. (ver Figura 2). Estas telas ya habían sido estudiadas como refuerzo superficial, pero sin embeberlas en ninguna matriz. Por ejemplo, Sofronie (1994) inició estudios experimentales de mallas biaxiales como refuerzo de elementos estructurales y elementos de mampostería. Los estudios que realizo Sofronie se efectuaron con el objetivo de reforzar construcciones de mampostería usando mallas poliméricas (ver Figura 3). Con los resultados de los estudios realizados, Sofronie publicó en 2005 un reporte sobre la caracterización de los materiales, los ensayos realizados y ejemplos de análisis y diseño.

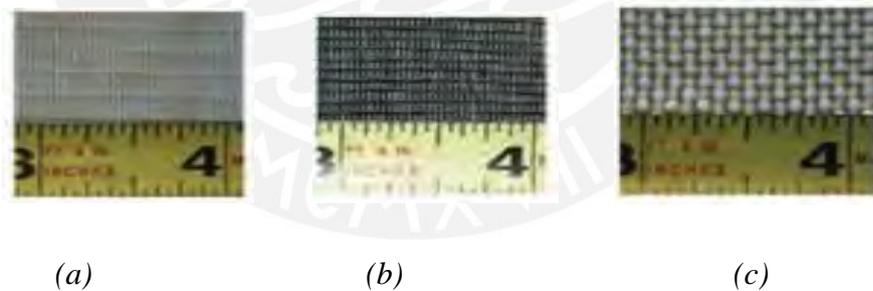


Figura 2-Diferentes tipos de fibras poliméricas:(a) polipropileno; (b) polietileno; (c) alcohol de polivinilo(Fuente: ACI 549.4R-13,2013)



Figura 3-Reforzamiento de un muro de mampostería con mallas poliméricas (Fuente: Sofronie,2005)

El estudio del refuerzo superficial con mallas sin matriz encontró que el proceso constructivo para el reforzamiento de muros de albañilería con mallas poliméricas es un proceso complejo, ya que es necesario anclar la malla y confinar por ambas caras el muro de albañilería para su correcto funcionamiento. Además, con este sistema de refuerzo no existe una adherencia directa entre la geomalla y el muro de albañilería. Los conocimientos adquiridos sobre las propiedades mecánicas y físicas de la malla polimérica y la matriz cementicia tuvieron como resultado la creación del sistema denominado FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*). La ventaja principal de los sistemas FRCM sobre los sistemas previos es su capacidad de crear adherencia directa entre el sistema de reforzamiento y el muro de albañilería, logrando así trabajar como una sola unidad. Asimismo, el procedimiento de instalación es normalmente a mano, no necesita maquinarias o herramientas especiales. La matriz cementicia se distribuye en toda la superficie a reforzar; a continuación, se colocan las mallas de fibras sobre la matriz; y luego, estas se presionan ligeramente sobre la matriz. Si se desea colocar más capas de fibras, estas deben colocarse antes de que se termine el curado completo de la capa cementicia anterior (ACI 549.4R-13,2013).

Los resultados experimentales(FRCM-muro de albañilería) muestran que contribuyen en la disminución la degradación de la resistencia, la restauración de la capacidad de carga del muro y la capacidad de disipación de energía (Augenti et al.,2011).Además, cuando el sistema FRCM se aplica en ambas caras de los muros, la

pseudoductibilidad aumenta en comparación con la aplicación de varias capas de mallas en una sola cara, y el incremento de resistencia que se produce depende del tipo de fibra usada (Babaeidarabad, De Caso, & Nanni, 2013).

1.4.Hipótesis

En los ensayos a tracción del FRCM realizados por diferentes autores, se evidencia que su comportamiento mecánico depende de la matriz, la malla y la interface matriz-malla. En nuestro caso el uso de geomalla con mortero tradicional deberá presentar la misma dependencia y además las siguientes características:

- No deberá presentar fallas por deslizamiento.
- Las fisuras por tracción deberán producirse en los nudos de la malla.
- Luego de la falla de la matriz cementicia, la matriz aún sigue aportando resistencia al sistema.

1.5.Objetivos

Objetivo general: Estudiar el comportamiento mecánico a tracción del sistema de refuerzo superficial: malla polimérica embebida en matriz cementicia.

Objetivos específicos:

1. Construir la curva bilineal del sistema malla polimérica embebida en matriz cementicia.
2. Explicar el comportamiento mecánico del sistema malla polimérica embebida en matriz cementicia

1.6.Metodología

Actividad 1: Determinar la curva de capacidad (curva bilineal) del sistema malla polimérica embebida en matriz cementicia.

- Tarea 1: Estudiar los criterios presentados en el código internacional AC434 (2016) para ensayar sistemas de refuerzo superficial embebidos en matriz cementicia.

- Tarea 2: Adaptar los criterios encontrados en el código AC434 (2016) al sistema de malla polimérica en matriz cementicia.
- Tarea 3: Presentar, para evaluación del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, el diseño de los ensayos al sistema de malla polimérica en matriz cementicia.
- Tarea 4: Ensayar los especímenes del sistema de refuerza superficial según la norma AC434
- Tarea 5: Construir la curva bilineal característica del sistema de refuerzo ensayado.

Actividad 2: Describir y analizar el comportamiento mecánico del sistema de refuerzo: malla polimérica embebida en matriz cementicia.

- Tarea 1: Estudiar el comportamiento mecánico de los componentes del sistema FRCM.
- Tarea 2: Describir los detalles del comportamiento de los especímenes ensayados.
- Tarea 3: Comparar y analizar el comportamiento de los especímenes FRCM con el comportamiento de los componentes del sistema.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1.Sistema FRCM

Los sistemas de refuerzo superficial FRCM (Fabric-reinforced cementitious matrix) son materiales compuestos, y están formados por una o más capas de estructuras de refuerzo embebidas en una matriz cementicia (ver figura 2.1). El refuerzo de los sistemas FRCM suele ser una malla abierta compuesta por hebras fabricadas a partir de fibras de aramida, fibra de vidrio, fibra de carbono o fibras poliméricas (Internacional Code Council 2016). Las mallas usadas como refuerzo no suelen ser isotrópicas en su plano, sino que tienen una dirección principal y secundaria de trabajo. Por otro lado, la matriz cementicia suele estar hecha de combinaciones de cemento portland, humo de sílice y/o ceniza volcánica (Babaeidarabad et al. 2014).



Figura 4-Sistema FRCM: malla embebida en matriz cementicia

Una de las principales ventajas de los sistemas FRCM es que su matriz inorgánica es compatible con superficies de aplicación de albañilería y concreto. Su compatibilidad permite que el reforzamiento no dañe a la estructura original durante su instalación, permitiendo su uso en monumentos históricos como iglesias (ver Figura 5). Además, la matriz de los sistemas FRCM posee alta permeabilidad al vapor y alta resistencia al fuego, y su aplicación es más segura para el operador (Lancioni et al. 2017). En resumen, los sistemas FRCM han demostrado no ser invasivos con edificios históricos, además de servir como capa protectora frente a efectos no estructurales (Bernardi et al. 2016).



Figura 5- Uso del sistema FRCM en un domo de una antigua iglesia en Grecia (Fuente: ACI 549.4R-13)

Aunque los sistemas FRCM son relativamente nuevos, por sus características y beneficios muchos fabricantes e investigadores han mostrado interés en esta técnica y han propuesto ensayos con el objetivo de determinar su comportamiento. Por ejemplo, en 2011 el International Code Council Evaluation Service (ICC-ES) publicó el código AC434, donde presentó los criterios mínimos de aprobación de sistemas FRCM y SRG. Luego en 2013, se publicó la guía de diseño y construcción ACI 549.4R-13 para sistemas FRCM. El contenido de estos códigos será detallado más adelante en el presente documento.

A diferencia de los materiales de construcción tradicionales, para los sistemas FRCM aún no se tiene una comprensión completa del comportamiento individual de sus componentes y de su interacción (Donnini et al.,2015). Es más, el efecto de los sistemas FRCM en el reforzamiento de estructuras sigue siendo un tema de investigación inconcluso debido a su compleja interacción entre la geometría del producto, la microestructura del material, las condiciones ambientales y las cargas.

2.1.1. Propiedades Mecánicas

El uso de materiales compuestos, como el FRCM, se ha ido incrementando en las últimas décadas debido a su bajo costo, buen comportamiento estructural, facilidad de transporte y colocación. Sin embargo, entender su comportamiento sigue siendo una de las mayores dificultades debido a su alta anisotropía y la compleja relación de resistencia entre matriz y fibra. Por ello, se propusieron micromodelos y macromodelos que pretenden simular analíticamente el comportamiento mecánico de los sistemas FRCM.

Los micromodelos se enfocan en el estudio de comportamiento del material a nivel de cada componente, la cual representa un alto costo computacional (Obraztsov y Vasilev, 1982). Mientras el macromodelo expresa el comportamiento mecánico como si fuera de un solo material, estando basado en la teoría de mezclas. Esta teoría permite estudiar al material compuesto como una combinación de materiales, logrando satisfacer las condiciones de compatibilidad de deformaciones. En el rango elástico es óptimo trabajar como un macromodelo, mientras que en el rango inelástico, como un micromodelo. Esto es debido a que en el rango elástico la deformación de los componentes son iguales, en tanto en el rango inelástico el tejido presenta mayor deformación que la matriz cementicia.

Por otro lado, diversos autores describen el comportamiento mecánico del sistema FRCM sometido al ensayo a tracción, en la cual se puede concluir que el tejido, la matriz cementicia y la interface matriz-tejido son determinantes para el entendimiento de su comportamiento. Esta propuesta indica que la interfaz es la responsable de transmitir los esfuerzos hacia el tejido (ver Figura 6). Donnini et al. (2016) presenta varios ensayos a tracción del sistema FRCM, en donde se evidencia que uno de los tipos de falla es por deslizamiento del tejido dentro de la matriz después de la formación de uno o dos grietas perpendiculares en la dirección de la carga. Este deslizamiento se debe a la baja adherencia entre el tejido y la matriz, y la alta viscosidad de la misma matriz que no permite que el tejido sea embebido completamente. La falla por deslizamiento no debe presentarse en el ensayo a tracción del sistema FRCM compuesto por geomalla y mortero, dado que la matriz penetra por las aberturas de la geomalla y logra embeber por completo; además el mecanismo de trabazón debería impedir el deslizamiento respecto a la matriz.

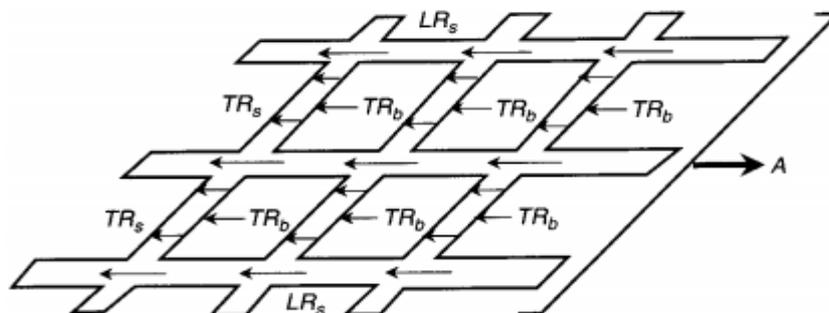


Figura 6- Esfuerzos debidos a la fricción y trabazón de la geomalla (Fuente: Koerner,2012)

Los ensayos a tracción del sistema FRCM conformados por mallas poliméricas mostraron que el mecanismo de trabazón permite a la matriz siga contribuyendo a la

resistencia del material incluso después de ocurrir la primera fisura. Esto posibilita que los esfuerzos sean transmitidos nuevamente hacia la matriz y se produzcan nuevas fisuras (Mobasher, 2011). Después de la primera fisura la geomalla contribuye a la tenacidad del compuesto, y cuando cese la aparición de las fisuras, la geomalla empieza a trabajar por sí sola hasta alcanzar su resistencia última donde ocurrirá la falla (Weiland, et al.,2007). Esto se puede evidenciar en la Figura 7 donde la curva esfuerzo-deformación del sistema FRCM y el tejido son paralelas una vez que las fisuras hayan finalizado.

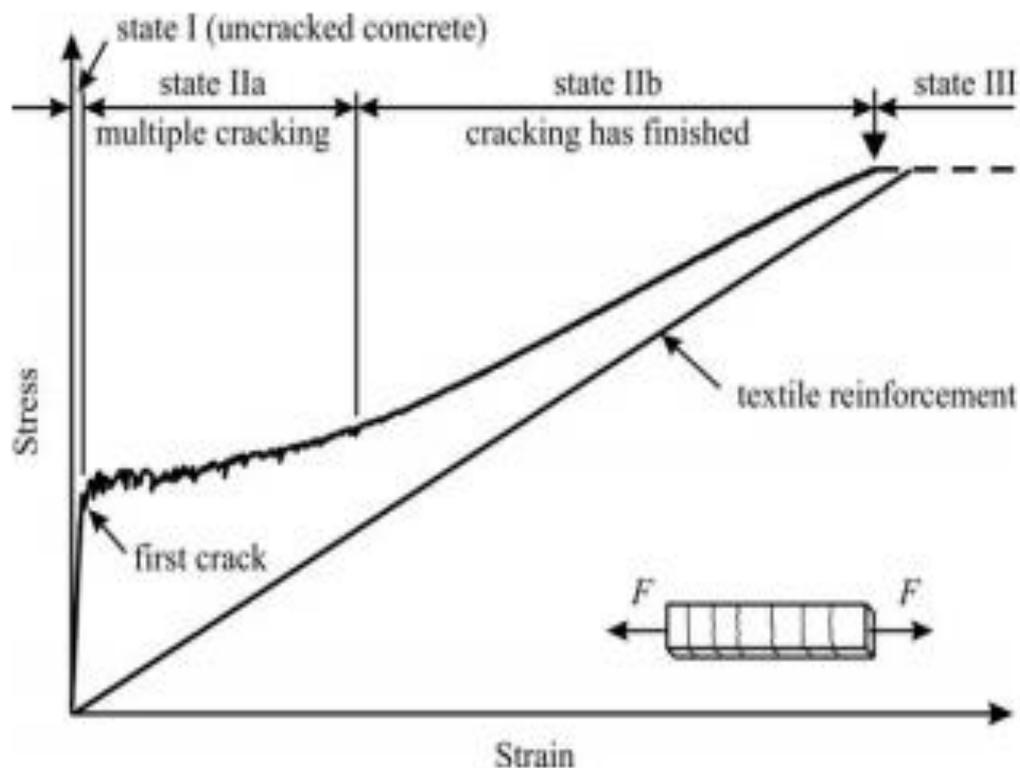


Figura 7- Esfuerzo vs deformación del sistema FRCM (Fuente: Weiland,2007)

Las fisuras, por lo general, aparecerán cerca de las costillas transversales, ya que estas no transportan ninguna carga en dirección transversal, por lo que se comporta como un poro con una gran longitud transversal. Las caídas de las cargas que se evidencia después de cada fisura en los ensayos realizados por Donnini et al. (2016) es debido a la baja cantidad de área del tejido que no fue capaz de absorber la energía liberado por la grieta. Esta energía disipada es la resultante de la suma de la energía disipada por cada componente más la disipación en la interfaz (Car,2000).

2.1.2. Estudios experimentales en muros de albañilería

Los resultados experimentales han demostrado que los sistemas de reforzamiento FRCM logran dar una mayor resistencia y ductilidad a los muros de albañilería; además de restringir el mecanismo de colapso (Mazoni, Dusi, & Mezzi, 2008). El mecanismo de transferencia de esfuerzos entre la malla y el muro se da a través de la matriz cementicia (mortero), los esfuerzos generados son redistribuidos por los nudos de la malla debido a su capacidad de confinar a la matriz (ver Figura 8).

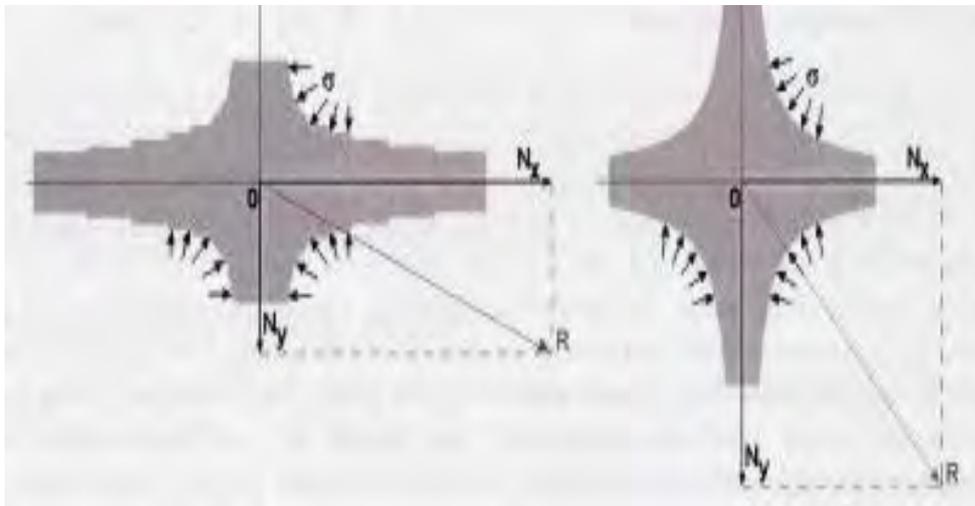


Figura 8- Mecanismo de transferencia de esfuerzos alrededor de los nudos (Fuente: Sofronie, 2005)

La capacidad del sistema FRCM de transferir esfuerzos se evidenció cuando Torrealva y Dusi (2007) realizaron una serie de ensayos corte-compresión en muros de albañilería con y sin refuerzo. En los muros de albañilería sin refuerzo se presentaron fisuras limpias a lo largo de una o dos diagonales (ver Figura 9(a)), mientras que en el muro reforzado con geomalla las fisuras son dispersas, logrando evitar la concentración de esfuerzos (ver Figura 9(b)). La malla no previene la formación de fisuras, solo se encarga de controlarla permitiendo una falla dúctil.

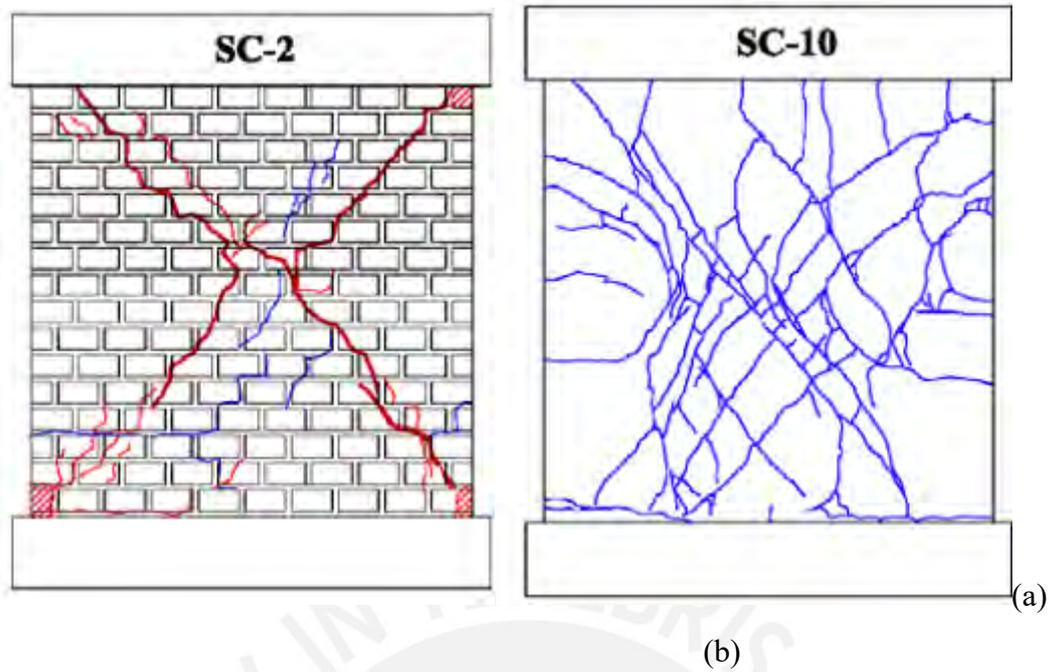


Figura 9-Patrón de formación de grietas: (a) un muro de albañilería sin refuerzo; (b) muro de albañilería con refuerzo FRCM (Fuente: Torrealva y Dusi, 2007)

Los ensayos lateral-cíclico realizados por Vega y Segundo (2007) en muros reforzados con geomalla y mortero, demostraron un aumento del 45% de la resistencia lateral en relación del muro simple. Además, manifiestan un incremento en la capacidad de absorción de energía en el rango inelástico del 200% respecto a los muros simples. En la Figura 10 se puede evidenciar esta absorción y disipación de energía de un muro de albañilería con y sin refuerzo FRCM sometidas a un ensayo corte-compresión.

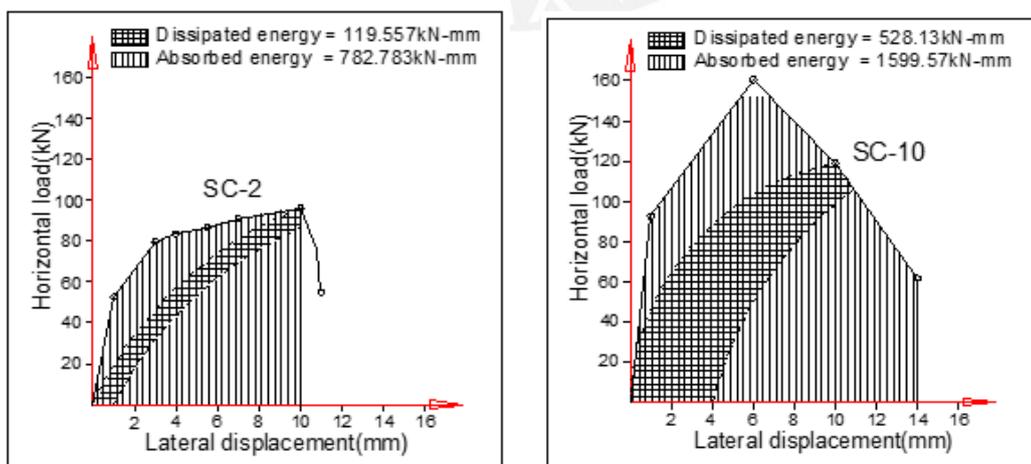


Figura 10- Absorción y disipación de energía : (a) muro de albañilería sin refuerzo; (b) muro de albañilería con refuerzo FRCM (Fuente: Torrealva y Dusi, 2007)

2.2.Marco Normativo

2.2.1. ACI 549.4R-13

El reporte ACI549.4R-13 fue publicado por el American Concrete Institute como una guía para el diseño y construcción de sistemas FRCM. El documento recopila el desarrollo histórico de los sistemas FRCM, sus características más resaltantes y, además, provee guías para su diseño, aplicación y revisión.

Los capítulos 1, 2 y 3 de la guía contienen información general y antecedentes sobre el sistema de refuerzo FRCM. Entre esta información se encuentran las ventajas de usar sistemas FRCM. El documento resalta las características de la matriz cementicia como la principal fuente de las ventajas del sistema. La composición de la matriz facilita la instalación del sistema, le da la capacidad de ser compatible con múltiples superficies y actuar como protector de la estructura original (ACI 2013).

También, en el capítulo 3, al hablar del desarrollo histórico de los sistemas FRCM, la guía ACI 549.4R-13 resume los resultados de investigaciones acerca de las propiedades mecánicas del sistema bajo esfuerzos axiales, de corte, de flexión y sísmicos. Además, el documento resalta la influencia de la geometría de la malla de refuerzo y la composición de la matriz cementicia en el comportamiento mecánico del sistema. Respecto a unidades de ladrillo, el informe concluye que el refuerzo superficial tipo FRCM provee un importante aumento en la resistencia y deformación de las unidades frente a cargas cíclicas en el plano, así como frente a cargas perpendiculares al plano del muro.

En el capítulo 4, la guía expone los tipos de estructuras en los que el sistema de refuerzo FRCM ha sido usado con resultados favorables. En elementos de concreto, los sistemas FRCM se han usado, principalmente, para reforzar bóvedas y pilotes de puentes, revestir túneles y proteger estructuras expuestas a altas temperaturas. Además, se reforzaron chimeneas de ladrillo, estructuras de albañería en escuelas y edificios históricos, utilizando sistemas FRCM de composición variada.

El capítulo 5 detalla los criterios de evaluación y aceptación de los materiales candidatos a ser constituyentes de un sistema de refuerzo FRCM. Luego, en el capítulo 6 se dan recomendaciones para el traslado, almacenamiento y manejo de los componentes

de los sistemas FRCM. Los criterios de evaluación y recomendaciones para sistemas FRCM se exponen más detalladamente en el código internacional AC434.

El informe contiene, en el capítulo 6, una guía para la instalación de sistemas FRCM. Los puntos importantes en la instalación de un sistema FRCM son: las condiciones ambientales en el momento, el método de preparación de los materiales constituyentes y las medidas de protección del sistema posterior a la instalación. El capítulo 8 enumera y resume los códigos aplicables para realizar una correcta inspección, evaluación y aceptación del sistema instalado. Además, en el capítulo 9, se da sugerencias para el mantenimiento y reparación de sistemas FRCM.

Los capítulos 10 al 14 dan recomendaciones para el diseño, en general, de concreto y albañilería reforzados con sistemas FRCM. Además, se presentan las ecuaciones necesarias para cuantificar la resistencia a flexión, corte y esfuerzos axiales de elementos de concreto o albañilería con refuerzo superficial FRCM. Finalmente, se dan detalles para el refuerzo referentes a los traslapes y longitudes de desarrollo de las mallas de refuerzo; y, en los capítulos 15 y 16, se dan instrucciones para la presentación de la documentación de los cálculos de diseño.

2.2.2. Código Internacional AC434

Las disposiciones de este código no tienen como intención impedir la utilización de algún material o método de diseño, sino estipular los criterios de aprobación de nuevas alternativas. El propósito del código es que el material, método o diseño propuesto alcance un mínimo de calidad, resistencia, durabilidad que le permita tener un comportamiento satisfactorio (ICC-ES 2016).

En general, el AC434 provee directrices para demostrar el cumplimiento de los códigos de este criterio usando ensayos característicos. Los criterios presentados son aplicables a sistemas de refuerzo superficial tipo FRCM y SRG.

El documento contiene, entre otros, los requerimientos mínimos de desempeño de los sistemas FRCM, los criterios básicos para los ensayos del sistema compuesto y los criterios mínimos aceptables de diseño. Además, en su Anexo A incluye una descripción detallada del ensayo de tensión en sistemas FRCM o SRG.

Criterio de cálculo de la resistencia a la flexión de albañilería con refuerzo FRCM

Las propiedades de los materiales FRCM necesarias para el cálculo y diseño de la albañilería reforzada se obtendrán de los ensayos a tensión descritos en el Anexo A del código AC434, los cuales se adaptarán más adelante a mallas de polipropileno embebidas en una matriz cementicia.

Para el diseño, la deformación en tensión del sistema FRCM actuando como refuerzo de corte (e_{fv}) se calculará con la siguiente ecuación:

$$e_{fv} = e_{fu} \leq 0.012$$

Luego la resistencia de diseño en tensión del sistema FRCM (f_{fe}) se calculará con la siguiente ecuación:

$$f_{fe} = E_f * e_{fv}$$

A continuación, el procedimiento de diseño contempla que el sistema FRCM fue aplicado en ambas caras del muro y orientadas perpendicularmente a la carga de corte aplicada. Además, se considera que las hebras de la malla de refuerzo no tienen un desalineamiento mayor a 5 grados.

Entonces, la resistencia de diseño a la flexión puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$\phi_m * M_n = \phi_m * (M_m + M_f)$$

Donde M_n es la resistencia nominal a la flexión, y M_m y M_f son la contribución de la albañilería y del material compuesto FRCM a la resistencia nominal, respectivamente. En el caso de albañilería no reforzada solo se considera el aporte de M_f . El valor del factor de reducción de resistencia para flexión, ϕ_m , para cualquier caso será igual 0.75.

Cuando el elemento de albañilería ha sido reforzado en ambos lados con el sistema FRCM, no se considerará la contribución del refuerzo en la cara en compresión.

2.2.3. Norma E.070

Como se mencionó líneas arriba que el sistema FRCM aporta en la resistencia al corte y a flexión de los muros, es importante conocer los requisitos mínimos para el análisis y diseño de los muros sin refuerzo superficial según la norma de reglamento nacional de edificaciones E.070 ; la cual estipula:

Resistencia al corte

- Para el control de fisuras de los muros por corte ante los sismos frecuentes, debe cumplirse que en cada entrepiso se satisfaga la siguiente expresión:

$$V_e \leq 0.55 * V_m = \text{Fuerza cortante admisible}$$

Donde:

V_e : Fuerza cortante producida por el sismo frecuente

V_m : Fuerza cortante asociado al agrietamiento diagonal de la albañilería

-La resistencia al agrietamiento diagonal de los muros de albañilería se calculará en cada entrepiso mediante la siguiente expresión:

$$V_m = 0.5 * V'_m * \alpha * t * L + 0.23 * P_g$$

Donde:

V'_m : Resistencia característica a corte de la albañilería

P_g : Carga gravitacional en servicio, con sobrecarga reducida acorde NTE0.30

t : Espesor efectivo de muro

L : Longitud de muros

α : Factor de reducción de resistencia al corte por efecto de esbeltez, la cual se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{1}{3} \leq \alpha = \frac{V_e * L}{M_e} \leq 1$$

Donde:

Ve: Fuerza cortante del muro obtenida del análisis elástico

Me: Momento flector muro obtenido del análisis elástico

Resistencia a flexión

- El muro de albañilería se supondrá que actúa como una losa simplemente apoyada en sus arriostres, sometida a la carga sísmica uniformemente distribuida. Esta carga por metro cuadrado de área (kg/m²) se calculará de la siguiente manera

$$w = 0.8 * Z * U * C1 * \gamma * e$$

Donde:

γ : Densidad de albañilería

e: Espesor bruto del muro (incluyendo tarrajeo)

U: Factor de importancia especificado en la NTE E0.030

C1: Coeficiente sísmico especificado en la NTE E0.030

- El momento flector distribuido por unidad de longitud producido por la carga sísmica “w” se calculará de la siguiente manera:

$$M_s = m * w * a^2$$

Donde:

m: Coeficiente de momento especificado en la NTE E0.70

a: Dimensión crítica del paño de albañilería.

- El esfuerzo admisible en tracción por flexión (f_t) será 0.15 MPa para albañilería simple y 0.30 MPa albañilería armada de concreto líquido.

- En la albañilería simple el esfuerzo normal producido por el momento flecto “ M_s ” se obtendrá como $f_m = 6 * M_s / t^2$, y no deberá ser mayor que 0.147 MPa.

CAPÍTULO 3: CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Debido a que el mortero es el componente con mayor variabilidad de los sistemas FRCC, uno de los ensayos que se realizará como control de los materiales será para determinar su resistencia a la compresión. Además, se realizarán ensayos para determinar la resistencia efectiva de la malla en sus dos direcciones.

3.1.Mortero (Matriz Cementicia)

El mortero es un compuesto formado principalmente por cemento, arena gruesa, agua y, en algunos casos, cal hidratada. Para estos ensayos se usará 1 solo tipo de mortero. La Tabla 1 muestra las características del mortero que se usará.

Tabla 1 Características del mortero a usar.

Nombre	Proporción de Cemento	Proporción de Cal	Proporción de Arena
Mortero	1	1	5

Los materiales que se usarán para elaborar el mortero contarán con las siguientes características:

- Cemento: será cemento normalizado Portland tipo I. De acuerdo con la información provista por el fabricante, cada bolsa de 42.5 kg tiene un peso volumétrico de 1500 kg/m³.
- Cal de obra: se usará la cal hidratada disponible en cualquier ferretería. Su uso mejora las propiedades del mortero como la trabajabilidad, la adherencia, la durabilidad, etc.
- Arena: se usará arena fina de granos redondeados graduada de acuerdo con los requerimientos de la norma ASTM D-75. La graduación de la arena contribuye a que el mortero resultante sea denso y resista a la intemperie.
- Agua: será agua limpia sin restos orgánicos o sustancias deletéreas.

El mortero se preparará mezclando los materiales antes mencionados, en la proporción adecuada, y agua hasta alcanzar un estado plástico que permita la trabajabilidad. La preparación se debe realizar en cantidades lo suficientemente pequeñas para asegurarse de que el mortero pueda ser usado en su estado plástico. Los lotes que excedan su periodo de vida en estado plástico no deben ser usados ya que el incremento de la viscosidad del material afectará la capacidad del mortero de embeber totalmente la malla (American Concrete Institute 2013).

3.1.1. Ensayo de Control ASTM C-579

El código internacional AC434 (2016) exige evaluar la resistencia a la compresión del mortero usado con el objetivo de que esta sea representativa de la resistencia del mortero usado en ensayos estructurales. El ensayo de compresión del mortero se realizará de acuerdo con la norma ASTM C-579, según el método de ensayo B.

Los especímenes serán 5 probetas cúbicas de 5 cm de lado por cada tipo de mortero usado. La Tabla 2 resume las características de los especímenes para cada condición de ensayo.

Tabla 2 Número de especímenes para cada tipo de mortero a ensayar.

Nombre	Proporción a cemento-cal-arena	Número de especímenes
Mortero	1:1:5	5

Los pasos a seguir para la preparación son los siguientes:

- 1) Preparar los moldes cúbicos de 5 cm de lado y colocar el respectivo desmoldante (ver Figura 11).



Figura 11-Molde cubierto con desmoldante para la preparación de los cubitos

2) Llenar con mortero hasta la mitad el molde y compactar con 16 golpes. Los golpes serán: 8 en una dirección y repartidos en toda la superficie, y 8 en la dirección perpendicular igualmente repartidos.

3) Llenar completamente el molde y compactar con la misma distribución de golpes que en el paso anterior (ver figura Figura 12).



Figura 12- Llenado del molde previo al enrase

4) Enrasar la superficie superior de las probetas respecto a la parte superior de los moldes.

5) Después de 24 horas, retirar las probetas de los moldes (ver Figura 13). El curado de las probetas se realizará sumergiéndolas en un recipiente con agua durante 28 días.



Figura 13- Retiro de los cubitos del molde después de 24 horas.

6) El ensayo de compresión se realizará a cada probeta individualmente en la máquina universal del Laboratorio de Estructuras a una velocidad de 1.25 mm/min entre cabezales (ver Figura 14). Si las caras de las probetas en dirección de la carga no son planas y lisas, se debe lijar. Es importante, alinear correctamente las probetas teniendo en

cuenta que las caras de aplicación de la carga son las caras laterales de la probeta cuando estuvo en el molde.



Figura 14-Ensayo de compresión del cubito de mortero

Este ensayo no refleja las condiciones reales de trabajo de la matriz cementicia en el sistema FRCM. El ensayo de compresión en el mortero solo tiene como fin controlar la calidad mediante la dispersión de resultados (San Bartolomé et al. 2011:70).

3.1.1.1.Resultados del Ensayo

Los especímenes de mortero tipo tarrajeo que se ensayaron se nombraron como “Mort” más el número de espécimen. Todos estos especímenes se tomaron de un mismo volumen de mezcla. La mezcla se realizó con la dosificación volumétrica de 1:1:5 para cemento:cal:arena respectivamente. A la mezcla se le agrego agua hasta alcanzar una consistencia plástica y levemente gomosa.

El ensayo de compresión nos permitió encontrar la carga máxima resistente de los cubitos y para calcular el esfuerzo se usó la siguiente formula:

$$\sigma_u = \frac{P_u}{A}$$

Donde:

$\sigma_u =$ Resistencia a la compresion (MPa)

$P_u =$ Carga maxima de rotura (N)

$A =$ Area de la seccion transversal del cubo (mm^2)

Los resultados de los ensayos y los cálculos realizados se muestran en la Tabla 3

Tabla 3 Resultados y cálculos de especímenes ensayados a compresión.

Especimen	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)	Esfuerzo máximo (MPa)	Promedio (Mpa)	Desviación estándar (Mpa)	Coefficiente de variación (%)
Mort01	51	51	2601	14.44	14.15	1.32	9.00
Mort02	51	51	2601	15.30			
Mort03	51	51	2601	15.78			
Mort04	51	51	2601	12.45			
Mort05	51	51	2601	12.79			

Además, la máquina de ensayos permitió obtener la deformación absoluta de los especímenes cuando eran cargados. El Gráfico 1 muestra el grafico Fuerza (kN) vs Deformación (mm) obtenido para los especímenes. Si se considera la altura del espécimen como la longitud total de este durante todo el ensayo se puede obtener un gráfico de Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm), el grafico correspondiente a los especímenes se muestra en el Gráfico 2

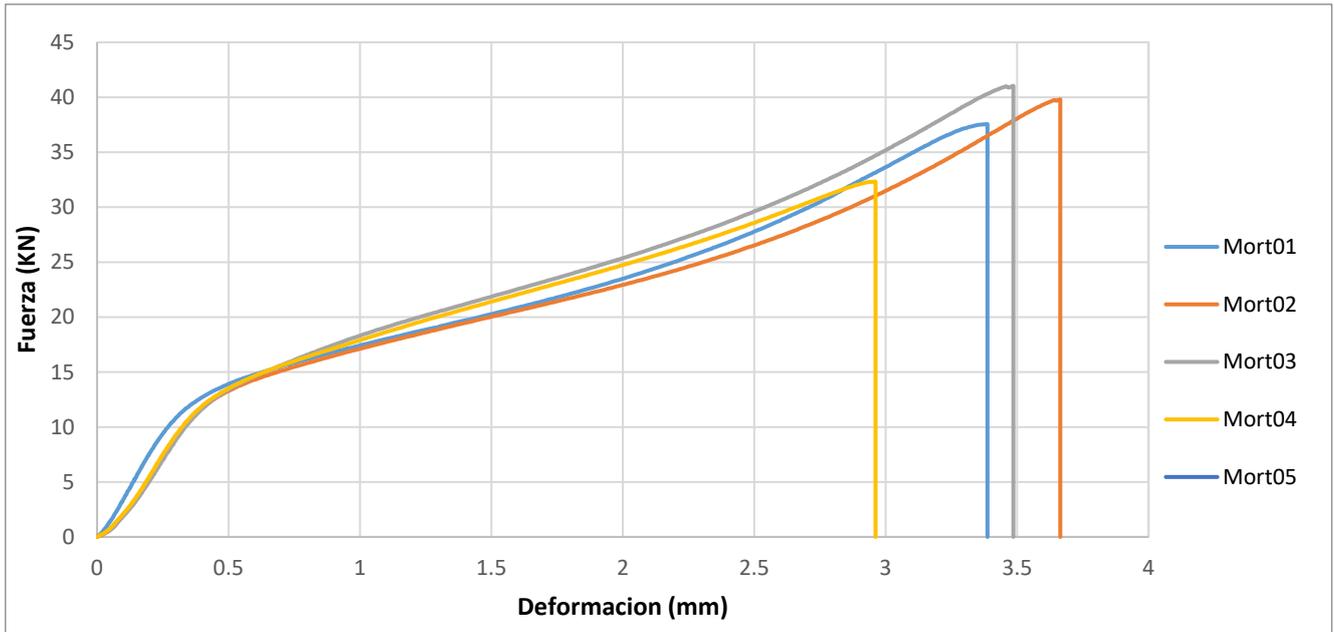


Gráfico 1 Fuerza (kN) vs Deformación (mm) de los especímenes

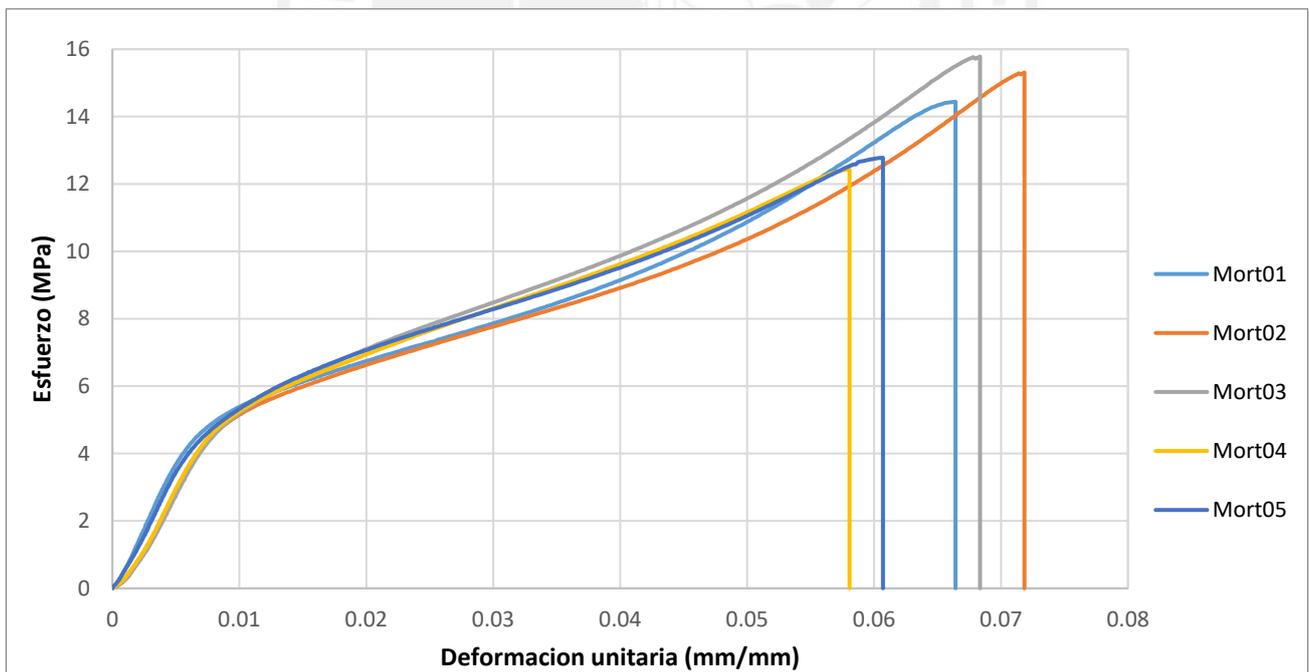


Gráfico 2 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de los especímenes

3.2.Malla Polimérica (Geomalla)

Koerner (2012) define a las mallas poliméricas, usualmente llamadas geomallas, como un material sintético formado por juegos de costillas paralelas cruzadas y conectadas entre ellas. Las geomallas biaxiales o multiaxiales son elaboradas desde una lámina de polipropileno, la cual es estirada y perforada para así lograr su alta resistencia y estructura continua (ver Figura 15). En su uso geotécnico, las aberturas de las mallas poliméricas tienen el tamaño suficiente para permitir el confinamiento del suelo y las piedras circundantes. Para nuestro estudio esta propiedad se conoce como la trabazón mecánica, la cual influenciará notoriamente en su resistencia debido a la sujeción entre la geomalla y la matriz cementicia, de tal forma que el mortero impedirá que la geomalla se desprenda.

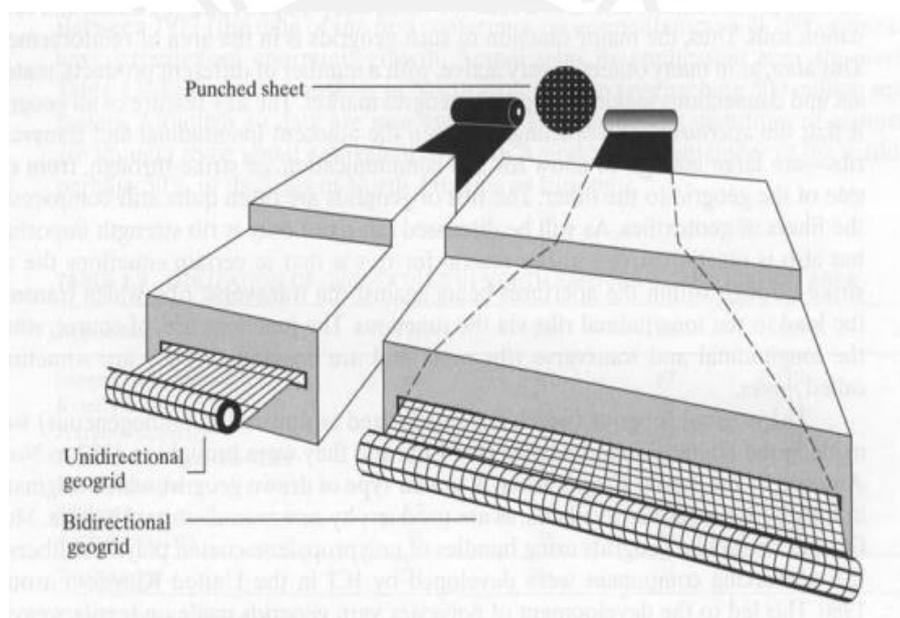


Figura 15-Proceso de fabricación de las geomallas (Fuente: Koerner,2012)

En algunas aplicaciones de las mallas poliméricas, la dirección de los esfuerzos principales es conocida, entonces se usa mallas uniaxiales. En casos como el de esta investigación, los esfuerzos principales tienen direcciones aleatorias, así que se usa mallas biaxiales o triaxiales. (Koerner,2012). Para esta investigación se usará una malla polimérica biaxial con aberturas rectangulares (ver Figura 16). Las dimensiones de las costillas de la geomalla son: en la dirección principal, 36.2 mm de longitud de la costilla y sección transversal de dimensiones 1.4 mm x 4.5 mm; y en la dirección secundaria, 40 mm de longitud de la costilla y sección transversal de dimensiones 2.45 mm x 3.1 mm.



Figura 16- Geomalla biaxial a usar para el sistema de reforzamiento FRCM.

3.2.1. Ensayo de Control ASTM C-579

Al evaluar la resistencia a la tensión de mallas poliméricas, usualmente se suele ensayar una costilla simple a tensión hasta la rotura y se observa su comportamiento. A veces, también es necesario evaluar los nudos de la malla mediante la tracción de una costilla fuera del nudo de las costillas transversales más próximas (Koerner ,2012).

Ensayo de tensión sobre una costilla individual: de acuerdo con la norma ATM D6637, se debe usar una máquina de ensayos que permita una deformación constante para tensionar las costillas individuales hasta la falla usando sujetadores estándar (ver Figura 17). En este caso se realizarán ensayos en cinco muestras de costillas paralelas a la dirección longitudinal y tres muestras paralelas a la dirección transversal de la malla para obtener sus propiedades mecánicas. Para nuestro estudio se podría obviar los ensayos a las costillas transversales, ya que durante el ensayo a tracción del sistema FRCM la costilla longitudinal será la que soporta la carga.



Figura 17-Ensayo a tracción de una costilla de la geomalla.

3.2.1.1.Resultados del Ensayo

Las muestras de malla polimérica que se ensayaron se nombraron con el prefijo “M”, más la letra “L” si corresponde a la dirección principal o “T” si corresponde a la dirección secundaria, más el número del espécimen. Los especímenes, cortados de la misma plancha de malla, se ensayaron a tensión. Los ensayos permitieron obtener la resistencia máxima de la malla (kN), y el gráfico de Fuerza (kN) vs Desplazamiento (mm). Se ensayaron cinco especímenes de la dirección principal y tres de la dirección secundaria. El Gráfico 3 muestra los gráficos Fuerza vs Desplazamiento de los especímenes. La tabla 3.4 muestra los resultados numéricos del ensayo de los especímenes.

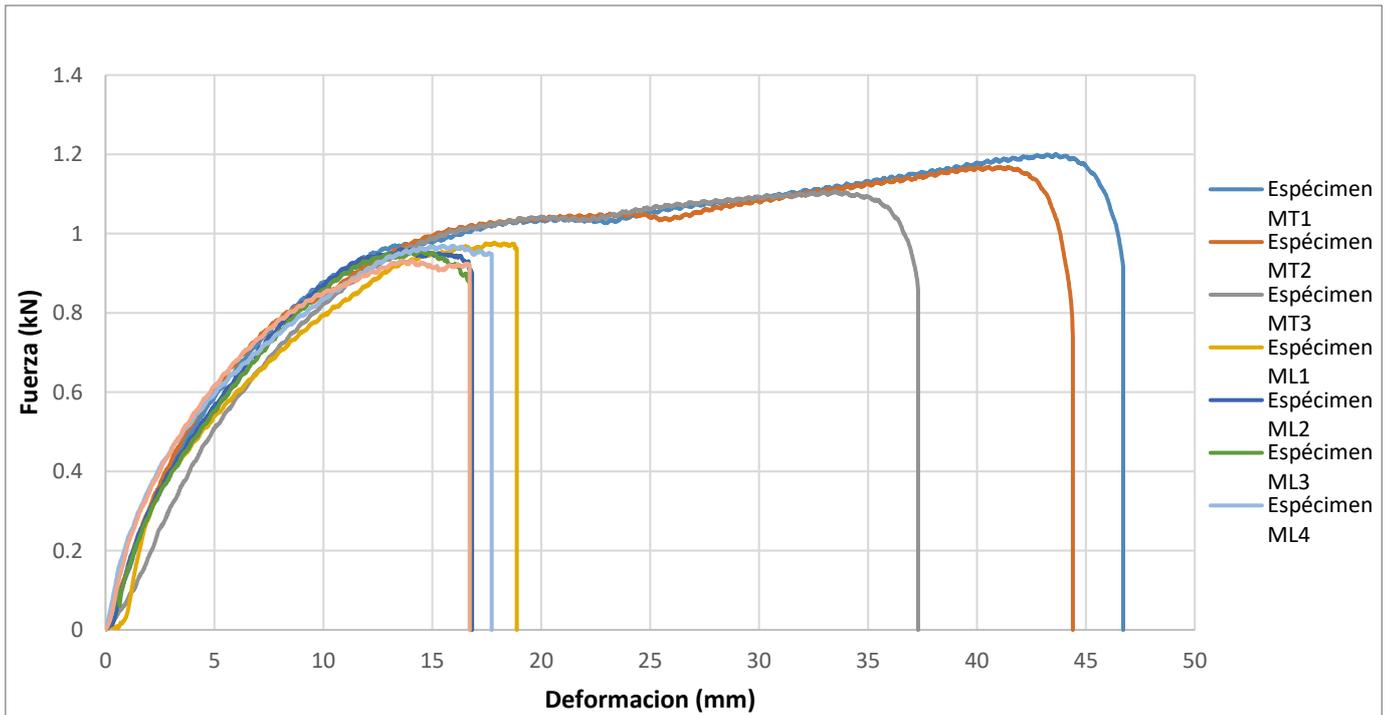


Gráfico 3 Fuerza (kN) vs Deformación (mm) de los especímenes

Tabla 4 Resultados del ensayo a tensión de los especímenes.

Especímen	Deformación (mm)	Resistencia (KN)	Def. Unitaria	Esfuerzo Máximo (MPA)
ML1	18.88	0.98	0.08	32.58
ML2	16.82	0.96	0.07	32.03
ML3	16.74	0.96	0.08	31.92
ML4	17.73	0.97	0.07	32.31
ML5	16.72	0.93	0.07	31.07
	Promedio	0.96	0.07	31.98
MT1	46.71	1.20	0.189	40.00
MT2	44.40	1.17	0.170	38.95
MT3	37.30	1.11	0.152	36.91
	Promedio	1.16	0.170	38.62

En la Tabla 4 el esfuerzo máximo se calculó usando la ecuación de esfuerzo indicada en los ensayos a compresión, usando como área transversal la sección de una costilla de la malla en su parte más central. La deformación unitaria se calculó tomando como longitud total inicial la longitud de cada espécimen medida antes del ensayo. Estos

cálculos se hicieron para toda la data del ensayo y se construyó la Gráfico 4 que muestra el grafico de Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm).

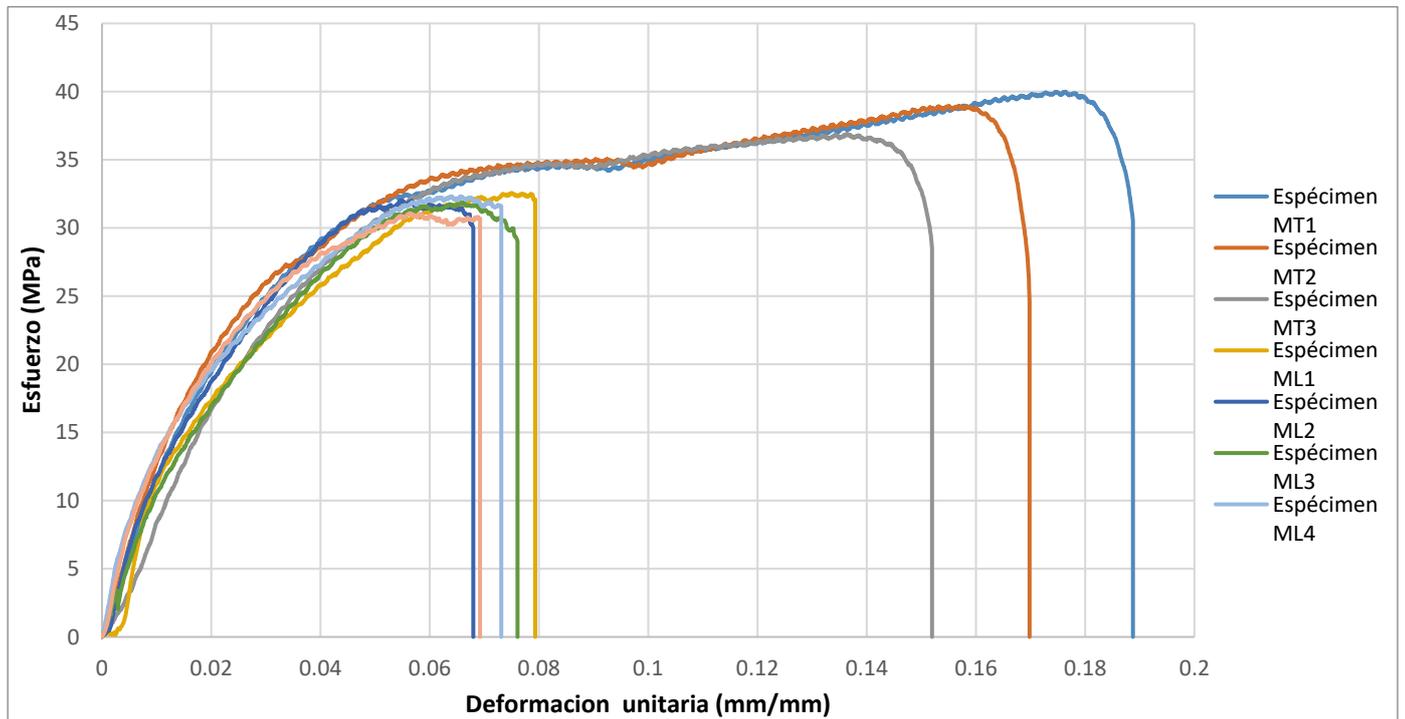


Gráfico 4 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de los especímenes.



CAPÍTULO 4: PREPARACIÓN Y DISEÑO DEL ENSAYO A TRACCIÓN DE LOS ESPECIMENES FRCM

4.1. Predimensionamiento de los especímenes

Para cada condición de ensayo se usarán 11 especímenes fabricados y curados en condiciones normales según el AC434. Las condiciones de ensayo solo variarán según la continuidad de la malla, ya que el tipo de mortero usado y la malla polimérica serán los mismos. La Tabla 5 resume las características de cada condición de ensayo.

Tabla 5 Número de especímenes para cada tipo de ensayo.

Ensayo	Malla	Condiciones	Número de especímenes
Tipo 1	Continua	Ambiente	11
Tipo 2	Traslapada	Ambiente	11

Los especímenes serán piezas rectangulares cortados de paneles más grandes fabricados en moldes especiales (ver Figura 18 (a)). En la fabricación, es crítico controlar el alineamiento de la malla, y que los métodos y herramientas de corte sean efectivos para evitar cortes inclinados y socavación.

Respecto a las medidas de los especímenes, el espesor de las piezas debe estar en función del número de capas de malla polimérica y su espesor. El ancho debe ser un múltiplo del espaciamiento de la malla, debe incluir un número mínimo de hebras y debe ser mayor que cuatro veces el espesor. La longitud mínima de la pieza debe ser igual a dos veces la distancia de agarre más dos veces el ancho de la pieza más la longitud del transductor usado. La distancia de agarre es la longitud en la que el espécimen está unido a sus respectivas lengüetas. Las lengüetas servirán como conectores entre el espécimen y los sujetadores de la máquina de ensayos. Las lengüetas serán metálicas (ver Figura 18(b)), tendrán el mismo ancho que los especímenes y estarán pegadas a ambos extremos del espécimen en ambos lados (cuatro lengüetas por espécimen). La longitud de la lengüeta se calculará usando la máxima carga de tensión esperada; la fuerza de unión entre la matriz cementicia, el pegamento y la lengüeta; y la longitud de desarrollo de las hebras

dentro de la matriz. Se recomienda una longitud mínima de la lengüeta de 4 pulgadas. El cálculo de la distancia de agarre se muestra en el Anexo A. El espesor de la lengüeta debe ser el adecuado para distribuir uniformemente la fuerza de sujeción en todo el ancho de las piezas. Como mínimo, se recomienda 1/16 de pulgada de espesor de las lengüetas.

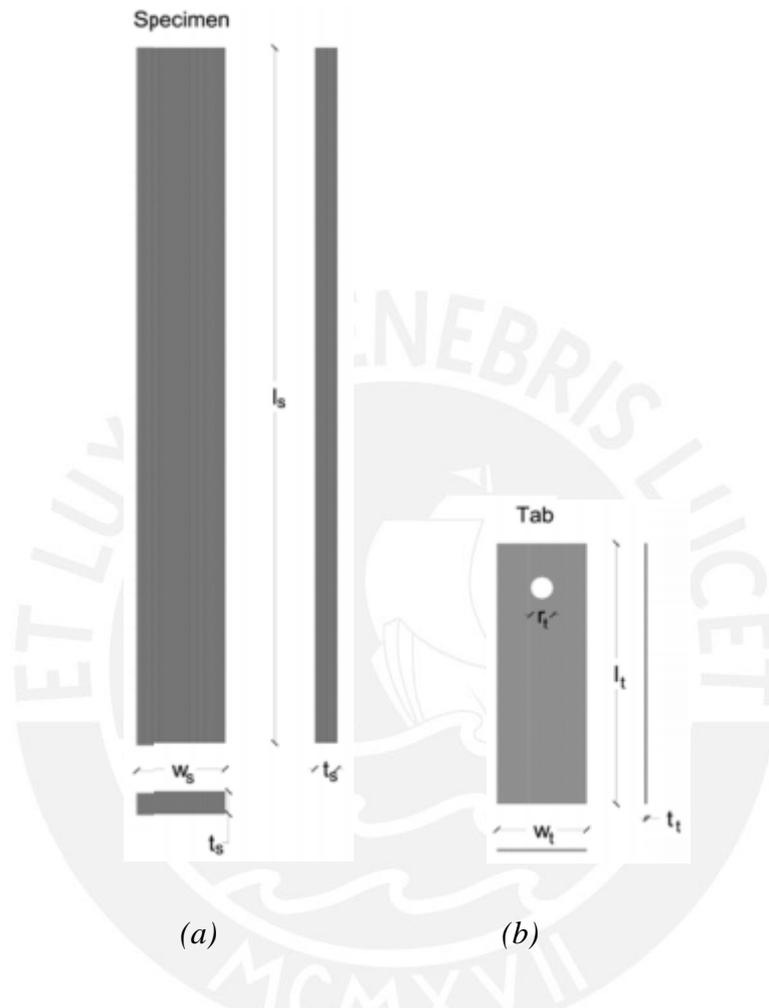


Figura 18- Esquema de las dimensiones: (a) Espécimen FRCM; (b) Lengüeta de metal (Fuente: AC434, 2016)

Teniendo en cuenta todas estas especificaciones, en la Tabla 6 y Tabla 7 se resumen las dimensiones características para cada tipo de espécimen y de las lengüetas, respectivamente y la figura 4.1 muestra un esquema de las dimensiones de los especímenes y de las lengüetas.

Tabla 6 Dimensiones de los especímenes de sistema FRCM.

Ensayo	Espesor del espécimen - t_s (mm)	Ancho de la abertura de la malla (mm)	Ancho del espécimen- w_s (mm)	Longitud del espécimen – l_s (mm)
Tipo 1	18	33	160	300
Tipo 2	18	33	160	300

Tabla 7 Dimensiones de las lengüetas en cada tipo de ensayo.

Ensayo	Espesor de la lengüeta mínimo - t_l (pulg)	Ancho de la lengüeta- w_l (mm)	Longitud de la lengüeta mínimo – l_l (mm)
Tipo 1	1/16	132	100
Tipo 2	1/16	132	100

4.2. Proceso constructivo de los especímenes

Con las dimensiones propuestas en la Tabla 6 se empezó a elaborar los especímenes de la siguiente manera:

- Del rollo total de la geomalla se cortó 3 planchas similares como se ve en la Figura 19, las cuales dos fueron usados para el armado de los especímenes con geomalla traslapada y el resto para el espécimen de geomalla continua.

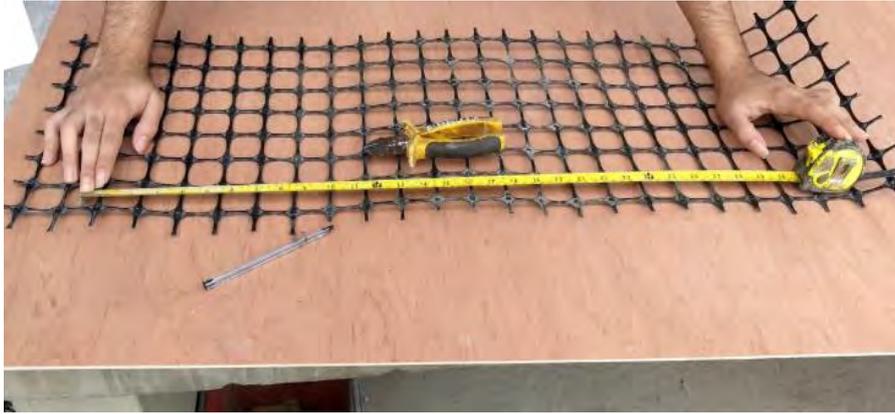


Figura 19-Plancha típica de geomalla para los paneles

- Se procedió a armar 3 marcos para cada tipo de panel (continua y traslapada) como se aprecia en la Figura 20(b). Los bordes del marco estaban conformados por dos listones de madera con la condición de que entre listón y listón la geomalla se encuentra centrada y estirada (ver la Figura 20 (a)), para esto se clavó la geomalla en todos los bordes de los marcos.



(a)



(b)

Figura 20-Preparación del Marco :(a) geomalla centrada entre los dos listones;(b)acabado final de los paneles.

- Antes del vaciado del mortero se colocaron pequeños dados o cuñas de madera para evitar el holgamiento de las mallas (ver Figura 21).

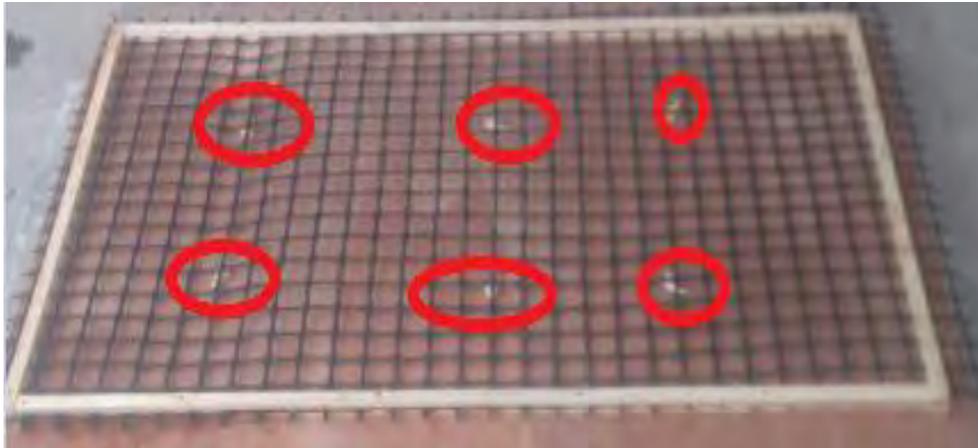


Figura 21- Colocación de daditos o cuñas de madera debajo de la geomalla

- Se continuó con el vaciado del mortero y mientras se avanzaba se retiraban los dados para no afectar su homogeneidad(ver Figura 22(a)). Luego se esperó un día hasta que endurezca el panel para continuar con el curado con yute humedo por 7 días (ver Figura 22 (b) y (c))



(a)



(b)



(c)

Figura 22-Vaciado y curado de los paneles : (a) vaciado del mortero ;(b) fraguado inicial ;(c) curado del panel con yute

- Pasado los 7 días de curado húmedo y 7 días en condiciones ambientales ,con una amoladora se pasó a cortar los paneles en piezas rectangulares con la finalidad de obtener los especímenes FRCM según el AC434 (ver Figura 23). Cada espécimen obtenido se lijó para eliminar el polvillo adherido.



Figura 23- Corte de los paneles en piezas rectangulares

- Finalmente, las lengüetas de acero fueron pegados en los dos extremos de cada espécimen (ver Figura 24), verificando que se encuentren centrados para no producir excentricidad en el momento de ensayar.



Figura 24-Pegado de las lengüetas de acero en los especímenes.

4.3. Instrumentación y Procedimiento del Ensayo a Tracción

El ensayo de tensión en el material compuesto FRCM se desarrollará de acuerdo con los criterios especificados en el Anexo A del código internacional AC434 (2016). El objetivo de este ensayo es obtener la curva de esfuerzo-deformación del material compuesto. De la curva de esfuerzo-deformación se obtendrá el esfuerzo y deformación de rotura y los módulos de elasticidad antes y después de la fractura de la matriz cementicia. La información que se obtenga será usada para el análisis y diseño estructural de muros de albañilería reforzados con sistemas FRCM compuestos por mallas poliméricas y matrices cementicias. La Figura 25 muestra un esquema general de la distribución de los elementos constituyentes del ensayo a tensión de sistemas FRCM. Los párrafos siguientes contienen una descripción detallada de los componentes del ensayo.

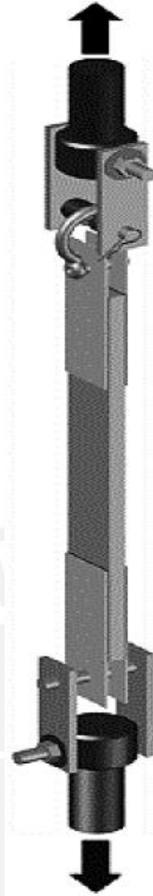


Figura 25- Esquema de la disposición del ensayo a tensión del sistema FRCM. (Fuente: Montesi 2015)

Aparatos

1. Instrumentos de medición: Los instrumentos usados deben ser apropiados para leer dentro del 1 % de las dimensiones de las muestras.
2. Máquina de ensayo: La máquina usada debe cumplir con los requerimientos de la ASTM E4. La máquina debe tener una cabeza móvil y una estacionaria, y debe ser capaz de aplicar una velocidad de deformación controlada a los especímenes. Adicionalmente, la máquina debe ser capaz de indicar el 1% del valor indicado como carga aplicada al espécimen. Se recomienda usar sujetadores auto-alineantes rotacionalmente para minimizar los esfuerzos de flexión en el espécimen. La máquina con la que se cuenta en el laboratorio es una máquina universal de ensayos MTS y sus características cumplen con lo especificado en la norma ASTM E4.

3. Mecanismo de agarre: Para transferir la carga de la máquina de ensayo a los especímenes se debe usar sujetadores tipo grillete como los que se muestran en la Figura 26. Además, al menos uno de los sujetadores (de preferencia el superior) debe permitir la rotación en dos planos perpendiculares. En ningún caso, se debe aplicar esfuerzos de mordaza a los especímenes durante el ensayo.



Figura 26- Modelo de sujetador tipo grillete. (Fuente: AC434 2016)

4. Instrumentos de medición de la deformación: Se sugiere usar extensómetros. El extensómetro usado debe cumplir los requerimientos de la ASTM E83, Clase B-1. El dispositivo debe medir como mínimo 2 pulgadas, y debe ser adecuado para incluir dentro de él al menos una de las fracturas transversales que experimente el espécimen. En caso se use un extensómetro, si el fisuramiento ocurriera en alguno de los nodos del dispositivo, el espécimen deberá ser descargado y el extensómetro será movido. Es importante, que el peso del extensómetro no cause flexiones importantes en el espécimen. Para nuestro estudio la máquina universal MTS cuenta con un extensómetro incorporado.

Procedimiento

1. Luego del condicionamiento y antes de los ensayos, especificar el tipo y geometría de los especímenes, y los parámetros de condicionamiento ambiental.

Para el cálculo de las propiedades mecánicas del sistema compuesto, se usará el área de la malla polimérica por unidad de ancho reportada por el fabricante. El área transversal del espécimen se calculará con la siguiente ecuación:

$$A = w_s * h_s$$

Donde:

w_s : ancho nominal de la pieza

h_s : espesor nominal.

El ancho y espesor del espécimen se medirán en tres posiciones a lo largo de la pieza, y luego estos valores se promediarán para obtener las medidas nominales.

2. Pegar las lengüetas a los especímenes. Permitir que el pegamento cure según las especificaciones del fabricante.
3. Colocar el espécimen en los sujetadores tipo grillete. Alinear cuidadosamente el eje del espécimen con la dirección del ensayo (ver Figura 27). Aplicar el 5 % de la carga de falla anticipada para enderezar el posible encorvamiento del espécimen. La figura 4.10 presenta un esquema de la disposición de los especímenes en la máquina de ensayo.



Figura 27 - Espécimen alineado en la dirección de la carga

4. Sujetar el transductor al espécimen, de preferencia, simétricamente respecto a los ejes longitudinal y transversal del espécimen.
5. Aplicar la carga bajo control de desplazamientos. Ajustar el ritmo de desplazamientos a 0.01 pulg/min o 0.2 mm/min. Se debe registrar la carga versus desplazamiento continuamente o a intervalos frecuentes.
6. Durante el ensayo, registrar las formas de ruptura o cualquier otro daño que pudiera causar una respuesta diferente a la lineal.
7. Si una fisura intercepta algún punto de apoyo del transductor, descargar el espécimen al nivel de carga inicial. Luego, remover el transductor, reinstalarlo y sujetarlo en una región no fisurada de la matriz cementicia. Cargar el espécimen con el mismo ritmo de desplazamiento y continuar con el registro.

8. Remover el transductor antes de la falla prevista a fin de no dañar el sensor. Sin embargo, registrar la carga aplicada hasta la falla.
9. Registrar la carga máxima, la carga de falla y los desplazamientos correspondientes. Además, registrar el modo de falla y su localización.
10. Repetir el procedimiento para todos los especímenes.

Resistencia de los empalmes

Al aplicar sistemas FRCM, probablemente, será necesario realizar empalmes en la malla de refuerzo. El código internacional AC434 (2016) exige determinar la resistencia de las zonas con empalmes en sistemas FRCM. Para calcular esa resistencia se realizarán ensayos de tensión en el material compuesto FRCM con empalmes en la malla de refuerzo.

La malla de refuerzo en el espécimen, para este ensayo, debe ser dos piezas con una longitud de traslape en la mitad de la pieza. La longitud del empalme no debe ser menor a la longitud de anclaje mínima de la malla, la longitud de la lengüeta o 4 pulgadas. Las dimensiones, la preparación y el curado de los especímenes; la preparación e instalación de las lengüetas; y las condiciones de agarre del ensayo deben seguir los mismos criterios de un ensayo normal de tensión en el material compuesto FRCM.

Para que el sistema sea aceptado la resistencia a la tensión del traslape debe ser mayor o igual a la resistencia de un espécimen con refuerzo continuo

CAPÍTULO 5: ANALISIS DE RESULTADOS

5.1. Resultados del Ensayo a Tracción

Se prepararon en total 22 muestras de especímenes FRCM. 11 especímenes correspondían a una malla continua embebida en la matriz cementicia y las otras 11 correspondían a las mallas con un traslape en el medio del espécimen embebidas en la matriz cementicia. Los especímenes con una malla continua se nombraron con el prefijo “C” seguido del número asignado a cada espécimen (ver figura Figura 28 (a)), es decir, se ensayó los especímenes C1, C2, C3, C4, etc. La misma nomenclatura se usó para los especímenes con malla traslapada, pero usando el prefijo “T” en lugar de “C” (ver Figura 28 (b)).



(a)

(b)

Figura 28-Ensayo a Tracción del Sistema FRCM:(a)malla continua;(b)malla traslapada.

Los ensayos realizados permitieron encontrar la resistencia máxima de los especímenes FRCM, así como la curva de Fuerza (kN) vs Deformación (mm) durante todo el ensayo de tensión. La

Tabla 8 y la Tabla 9 muestran los resultados numéricos de los ensayos a tensión de los especímenes FRCM.

Tabla 8 Resultados del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla continua.

Espécimen	Espesor (mm)	Ancho (cm)	Largo total (cm)	Resistencia máxima (kN)
C02	19.0	16.1	31.9	3.69
C03	19.5	16.0	31.9	3.60
C04	18.3	16.2	31.8	3.56
C05	19.0	15.7	31.6	3.55
C06	19.3	16.0	31.6	3.63
C09	18.3	16.1	32.3	3.91
C10	20.0	16.0	32.3	3.64
C11	18.3	16.0	32.5	3.77
C12	18.3	15.4	32.5	3.79
C13	19.0	16.2	32.7	3.89
C14	17.5	15.7	32.0	3.71
Promedio				3.70

Tabla 9 Resultados del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla traslapada.

Espécimen	Espesor (mm)	Ancho (cm)	Largo total (cm)	Resistencia máxima (kN)
T02	18.5	16.2	32.0	3.91
T03	18.8	15.3	32.0	3.83
T04	17.8	15.5	32.0	3.98
T07	18.8	15.5	32.4	3.93
T08	18.5	16.5	31.1	5.81
T09	19.0	15.6	31.0	4.20
T10	18.8	15.6	31.0	3.98
T11	18.0	15.7	31.0	3.99
T12	19.0	15.4	30.9	3.83
T13	19.5	15.5	31.0	3.85
T14	19.3	15.4	31.0	6.58
Promedio				4.35

A partir de los resultados de las tablas 8 y 9 se calculó el esfuerzo y deformación unitaria durante toda la historia de los ensayos y los máximos respectivos. Para calcular el esfuerzo se usó el área de malla en tensión en los especímenes, es decir, cuatro costillas por espécimen. La deformación unitaria se calculó con la distancia entre las placas sujetadoras de cada espécimen. Los resultados de este análisis se muestran en las tablas 10 y 11, y en los gráficos 5 y 6.

Tabla 10 Resultados y cálculos del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla continua.

Especímen	Área de malla (mm ²)	Largo efectivo (cm)	Resistencia máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria Máxima
C02	30.0	24.8	3.69	122.84	0.048
C03	30.0	22.0	3.60	120.10	0.045
C04	30.0	24.3	3.56	118.47	0.023
C05	30.0	23.6	3.55	118.57	0.026
C06	30.0	24.2	3.63	120.83	0.028
C09	30.0	24.6	3.91	130.08	0.075
C10	30.0	25.6	3.64	121.73	0.074
C11	30.0	23.6	3.77	125.86	0.073
C12	30.0	25.6	3.79	126.59	0.036
C13	30.0	25.0	3.89	129.70	0.047
C14	30.0	25.6	3.71	123.93	0.038
Promedio			3.70	123.52	0.047

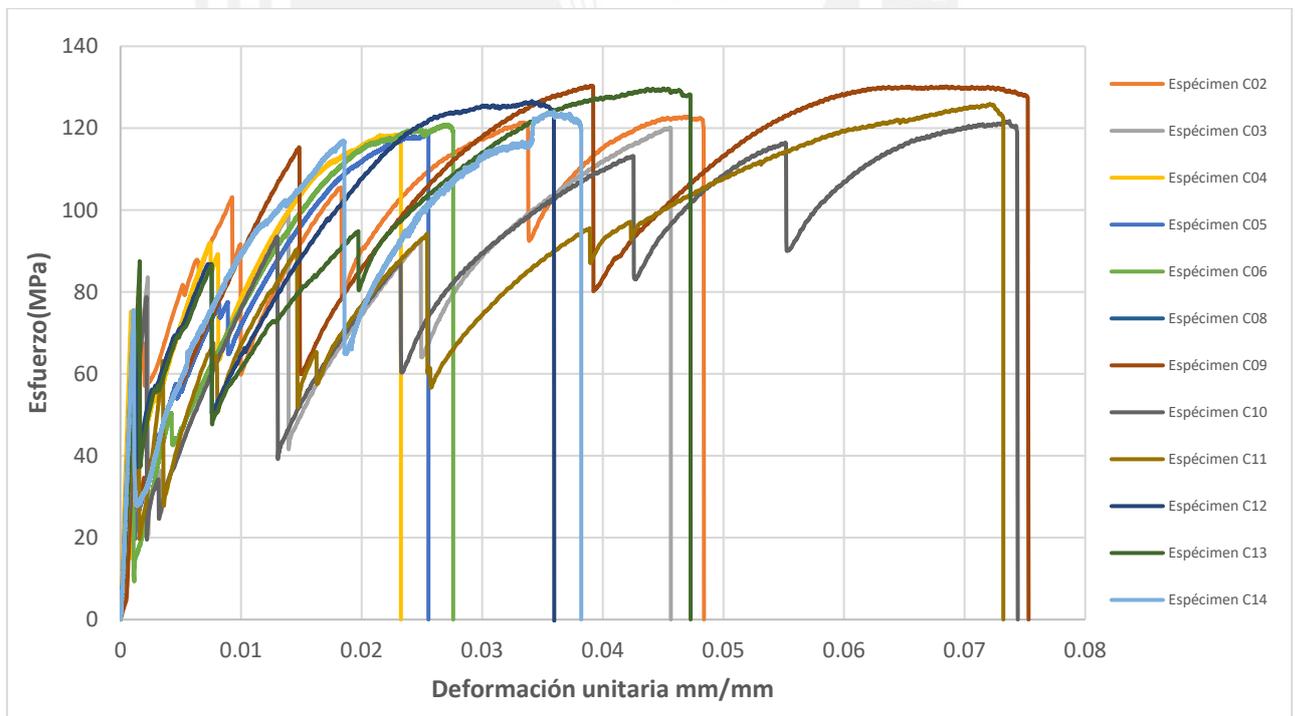


Gráfico 5 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de especímenes FRCM con malla continua.

Fig. 5.4: Grafico Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de especímenes FRCM con malla continua.

Tabla 11 Resultados y cálculos del ensayo a tensión de los especímenes FRCM con malla traslapada

Espécimen	Área de malla (mm ²)	Largo efectivo (cm)	Resistencia máxima (kN)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación Unitaria Máxima
T02	30.0	21.5	3.91	129.41	0.031
T03	30.0	20.9	3.83	127.67	0.090
T04	30.0	21.7	3.98	129.66	0.075
T05	30.0	21.1	3.93	128.76	0.053
T06	30.0	21.3	5.81	192.31	0.032
T09	30.0	24.2	4.20	139.95	0.026
T10	30.0	19.8	3.98	131.61	0.082
T11	30.0	19.8	3.99	131.97	0.055
T12	30.0	22.0	3.83	127.77	0.043
T13	30.0	19.9	3.85	127.75	0.046
T14	30.0	20.3	6.58	217.84	0.042
Promedio			4.35	144.07	0.052

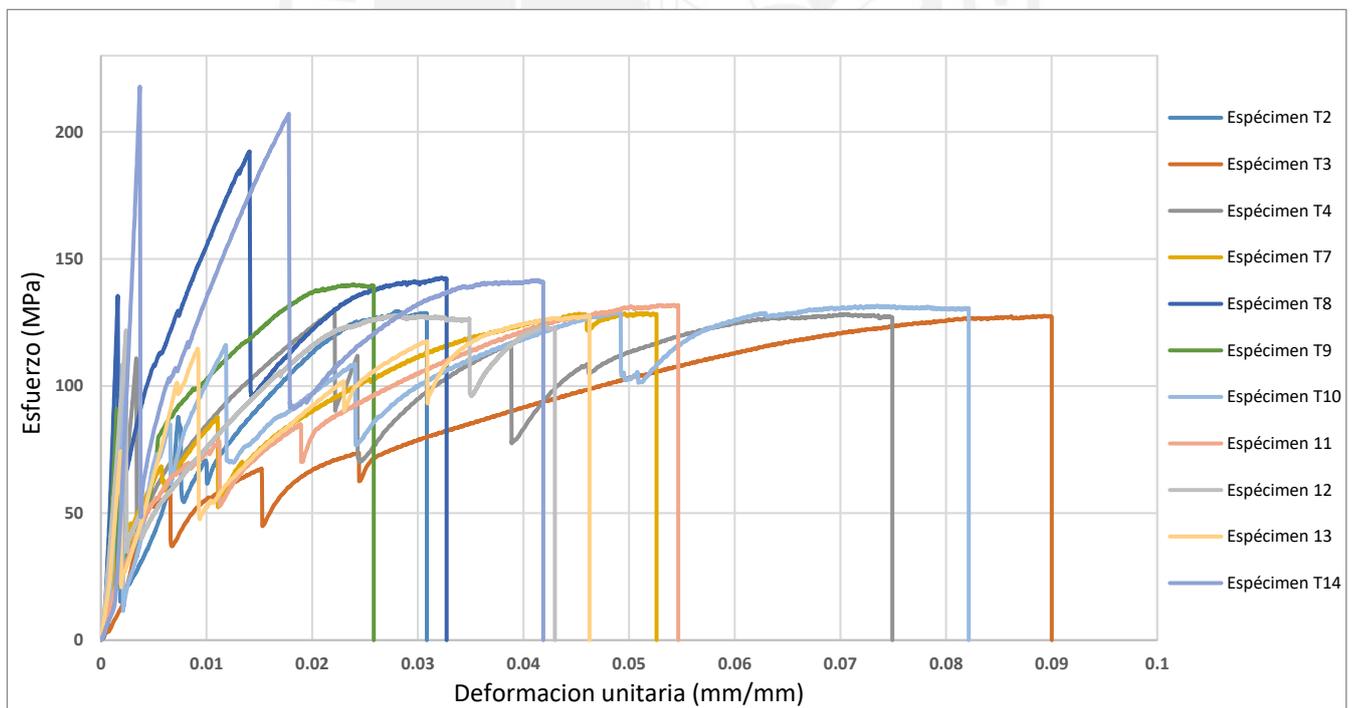


Gráfico 6 Esfuerzo (MPa) vs Deformación unitaria (mm/mm) de especímenes FRCM con malla traslapada.

5.2. Análisis de los resultados y construcción de la curva bilineal

Carozzi et al. (2016) menciona tres tipos de fallas en el sistema FRCM sometida a tracción. La primera es el deslizamiento del textil respecto a la matriz; la segunda, el deslizamiento del textil y la falla de los filamentos; y por último, la delaminación o pérdida de la capa de mortero. Sin embargo, durante los ensayos no ocurrió una falla por deslizamiento, debido al mecanismo de trabazón de la geomalla. Sino más bien falla por resistencia última a tracción de una costilla de la geomalla o el desprendimiento íntegro del mortero (ver Figura 29)



Figura 29-Modos de falla del sistema FRCM (geomalla y mortero): resistencia última a tracción de la geomalla;(b) desprendimiento del mortero.

La mayoría de fisuras que se muestra en la Figura 30 aparecieron aledañas a la fibra transversal de la geomalla, debido a su comportamiento similar a un poro de gran longitud mencionado líneas arriba. Cuando ocurre una microfisura la carga se distribuye y una vez que una macrogrieta atraviesa la muestra, en ese transcurso, se transfiere toda la energía dinámica a la sección a la fibra(Arboleda,2014). El esfuerzo que toma la geomalla, en ese lapso, lo vuelve a repartir a la interfaz, y está a la matriz. Por esta razón, aparecen múltiples fisuras como se observa en la Figura 30



Figura 30-Desarrollo de múltiples fisuras durante el ensayo a tracción del sistema FRCM

Durante el ensayo a tracción de los especímenes, el desarrollo de la curva esfuerzo vs deformación muestra múltiples caídas de carga por cada aparición de una fisura. Como ejemplo en la Figura 31, durante el ensayo del espécimen C10 se pudo evidenciar 5 caídas debido a las fisuras y una última debido a la resistencia última de la geomalla. Las fisuras producidas en el espécimen son las que genera la ductilidad al sistema o conocido en la literatura como pseudo-ductilidad.

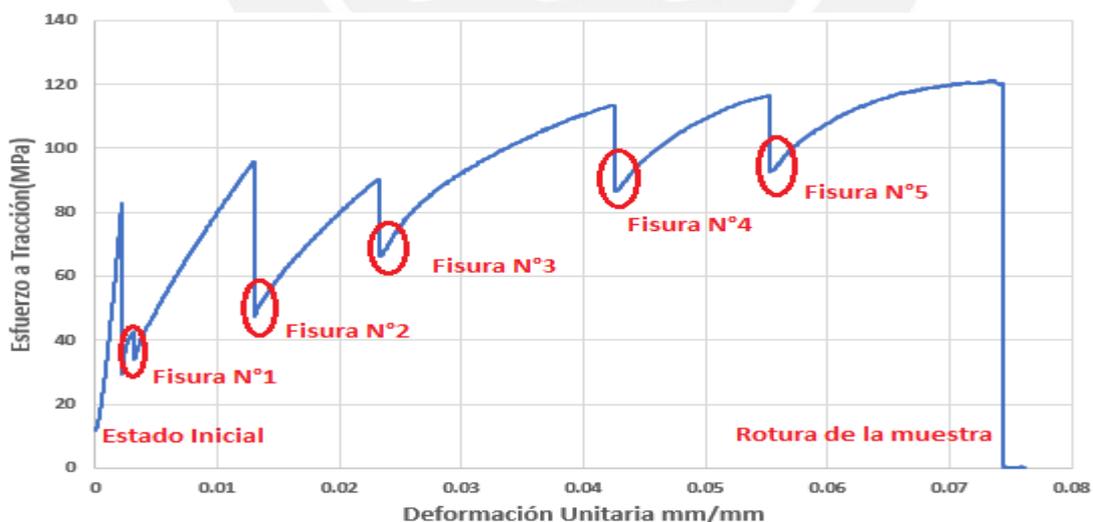


Figura 31- Curva Esfuerzo vs Deformación del espécimen C10

La Figura 32 muestra la aparición de cada fisura relacionado con los puntos de caídas de la Figura 31. Antes de la primera fisura, la tensión aplicada al espécimen es tomada por la contribución del mortero y la geomalla. Una vez que ocurra la primera fisura, el

mortero deja de trabajar en ese lapso, y solo la geomalla toma la carga, provocando un descenso del esfuerzo de tensión. Luego la geomalla reparte el esfuerzo a la interfaz y esta hacia a la misma geomalla y al mortero. Finalmente, el comportamiento se repite durante las demás formaciones de fisuras de cada caída de carga.



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

(f)



(g)

Figura 32-Fisuramiento del espécimen ensayado:(a) estado inicial-elástico;(b) primera fisura;(c) segunda fisura; (d) tercera fisura; (e) cuarta fisura ;(f) quinta fisura ;(g) rotura final.

Mechtcherine (2013) presenta una curva teórica de esfuerzo vs deformación como se ve en la Figura 33, en la cual asume que existe una unión perfecta entre la matriz cementicia y el textil. La curva teórica muestra tres estados importantes para entender su comportamiento. Estado I, la tensión del compuesto está por debajo de la resistencia a la tracción de la matriz, y la rigidez del compuesto es aproximadamente la misma que la rigidez de la matriz. En este estado el compuesto presenta un comportamiento elástico. Después de la primera fisura, la carga es transferido a través del textil y se inicia un patrón de fisuramiento en el Estado IIa. Una vez que las apariciones de las fisuras han cesado, inicia el Estado IIb donde el textil alcanza su resistencia última a la tracción. A lo largo de este estado la rigidez del compuesto es aproximadamente paralela a la rigidez del tejido.

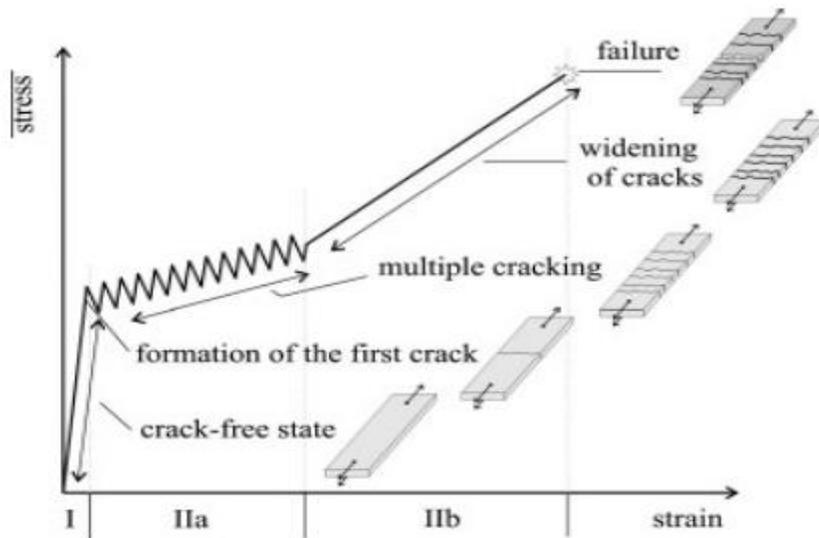
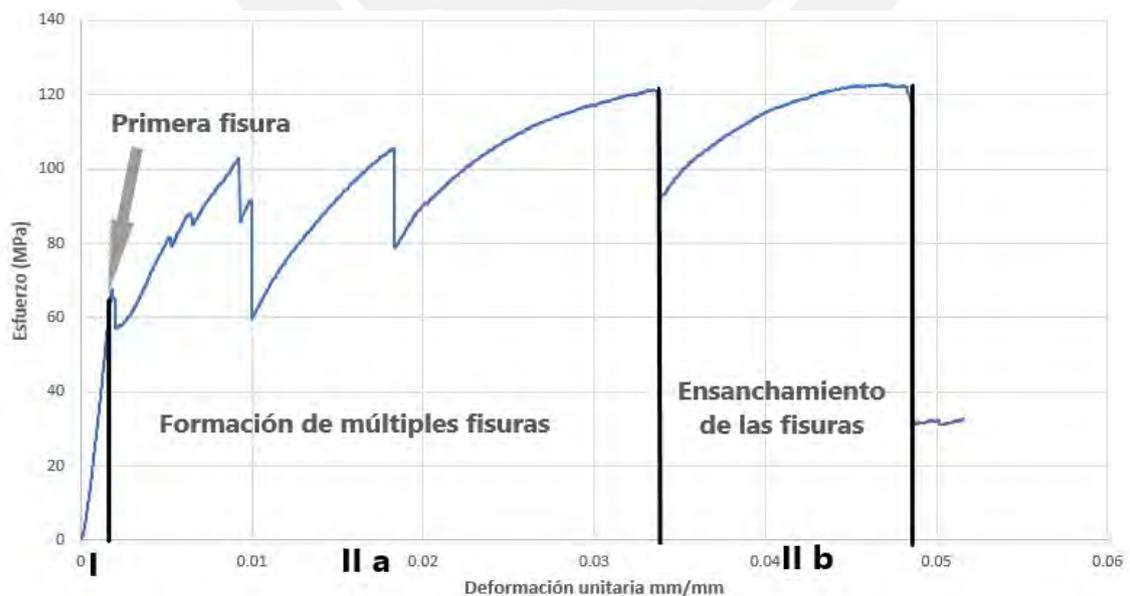
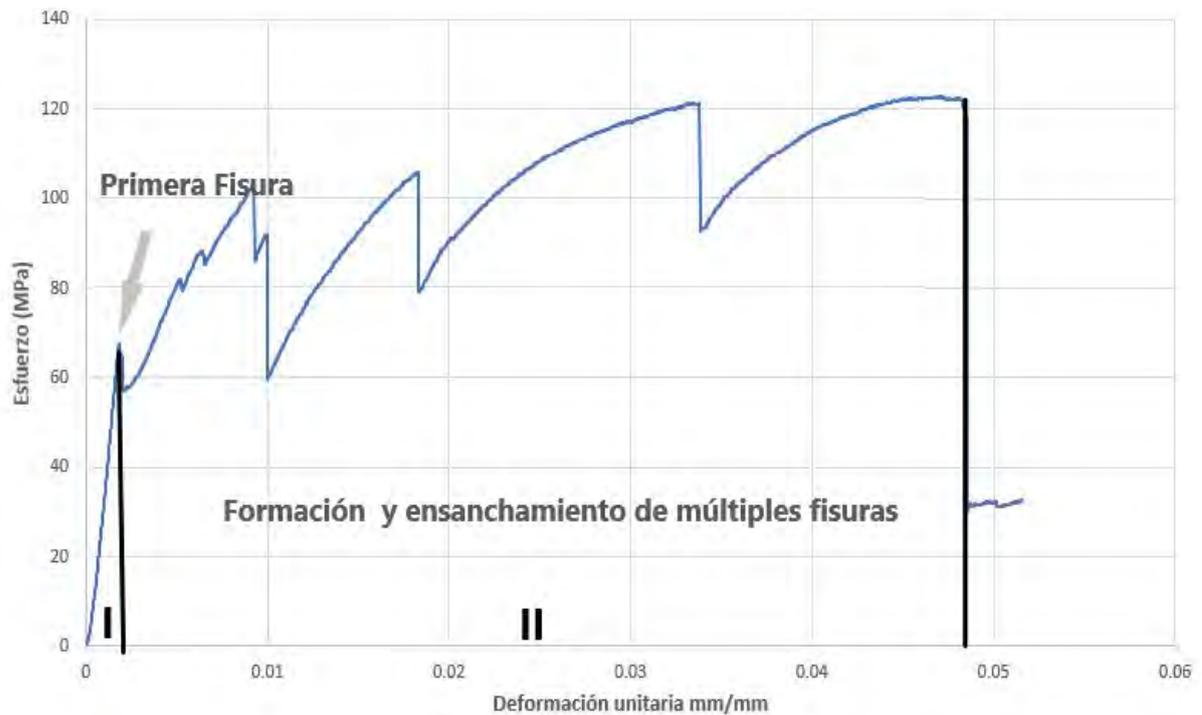


Figura 33-Curva de esfuerzo vs deformación teórica (Fuente: Mechtcherine 2013)

En nuestros ensayos, las curvas de esfuerzo vs deformación no muestran un tramo predominante del trabajo exclusivo de la geomalla, es decir que el Estado IIb no es muy influyente. En la Figura 34(a) se puede apreciar los 3 estados según Mechtcherine (2013), pero el tramo del *Estado IIB* no es muy distinguido debido a la baja deformación unitaria de la geomalla después del cese de la aparición de las fisuras. Por esta razón, la curva es finalmente dividido en 2 zonas como se aprecia en la Figura 34(b), donde la zona I corresponde al estado elástico antes de la primera fisura y la zona II, a la formación y ensanchamiento de las fisuras simultáneamente.



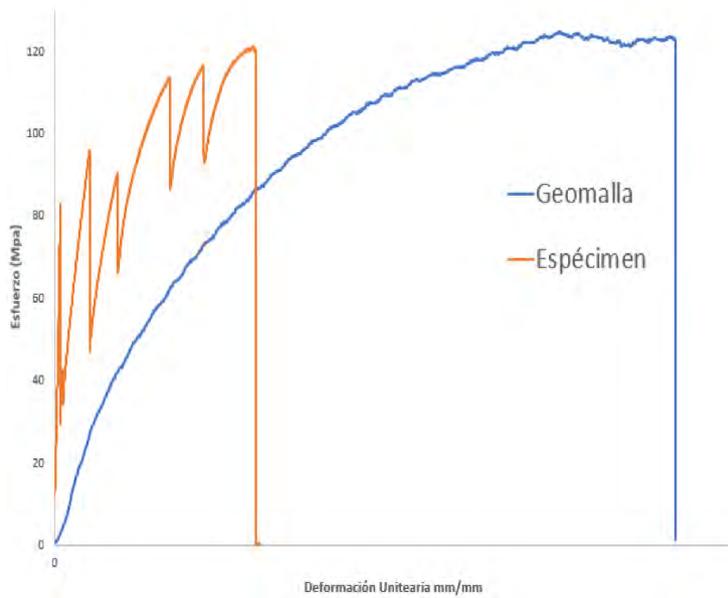
(a)



(b)

Figura 34-Curva de esfuerzo vs deformación del ensayo a tracción del sistema FRCM (geomalla y mortero) :(a) división en 3 zonas según Mechtecherine (2013) ;(b) división en 2 zonas según su comportamiento.

Aparentemente la deformación unitaria de los especímenes no logra alcanzar a la deformación última de la geomalla obtenida de los ensayos a tracción. En la figura 5.12 se observa que el espécimen FRCM alcanza rápidamente la resistencia última de la geomalla, y falla antes de llegar a su deformación última. Esto es ilógico debido que no se estaría cumpliendo las ecuaciones de compatibilidad con las condiciones de su entorno. Si se observa detalladamente la Figura 35(b), se puede apreciar que en las zonas encerradas de color verde la matriz cementicia no permite la deformación de la geomalla, ya que la tiene completamente embebida, más bien la única deformación que se genera son en las zonas de fisuramiento donde la geomalla se encuentra libre. Por consiguiente, se deduce que la geomalla no trabaja a lo largo de toda su longitud, sino solo en las zonas donde se generan las fisuras



(a)



(b)

Figura 35- Ensayo a tracción :(a) esfuerzo vs deformación;(b) espécimen ensayada

Esto se puede comprobar mediante el Gráfico 7 la cual muestra que la deformación máxima de la geomalla para este caso es similar a unos de los especímenes ensayados debido a que presentó fisuras paralelas a cada filamento perpendicular a la carga, logrando así longitudes libres de la geomalla donde se desarrollaron las deformaciones. Si se desea calcular la deformación unitaria de la geomalla no se debe usar la longitud total, sino las longitudes que quedan en descubierta luego de cada aparición de una fisura

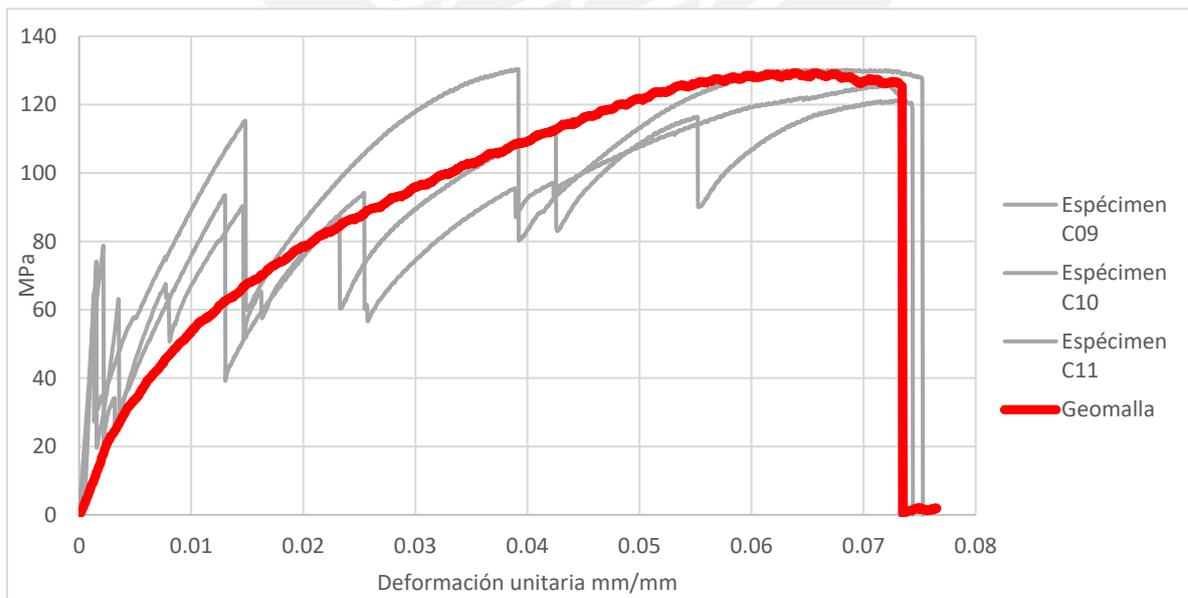


Gráfico 7 Deformación unitaria de la geomalla y los especímenes C09,C10 y C11

Acorde a las deformaciones unitarias pudimos agrupar en 4 grupos los especímenes ensayados (ver Figura 36). El grupo 1 (color morado) es el que presenta menor deformación y esto se debe a que solo presentó una fisura antes de que llegara a su resistencia última. Mientras que el grupo 2 (color azul) presentó 2 fisuras hasta llegar a su carga última, el grupo 3 (color verde) presentó 3 fisuras y el grupo 4 (color rojo) presentó 4 fisuras.

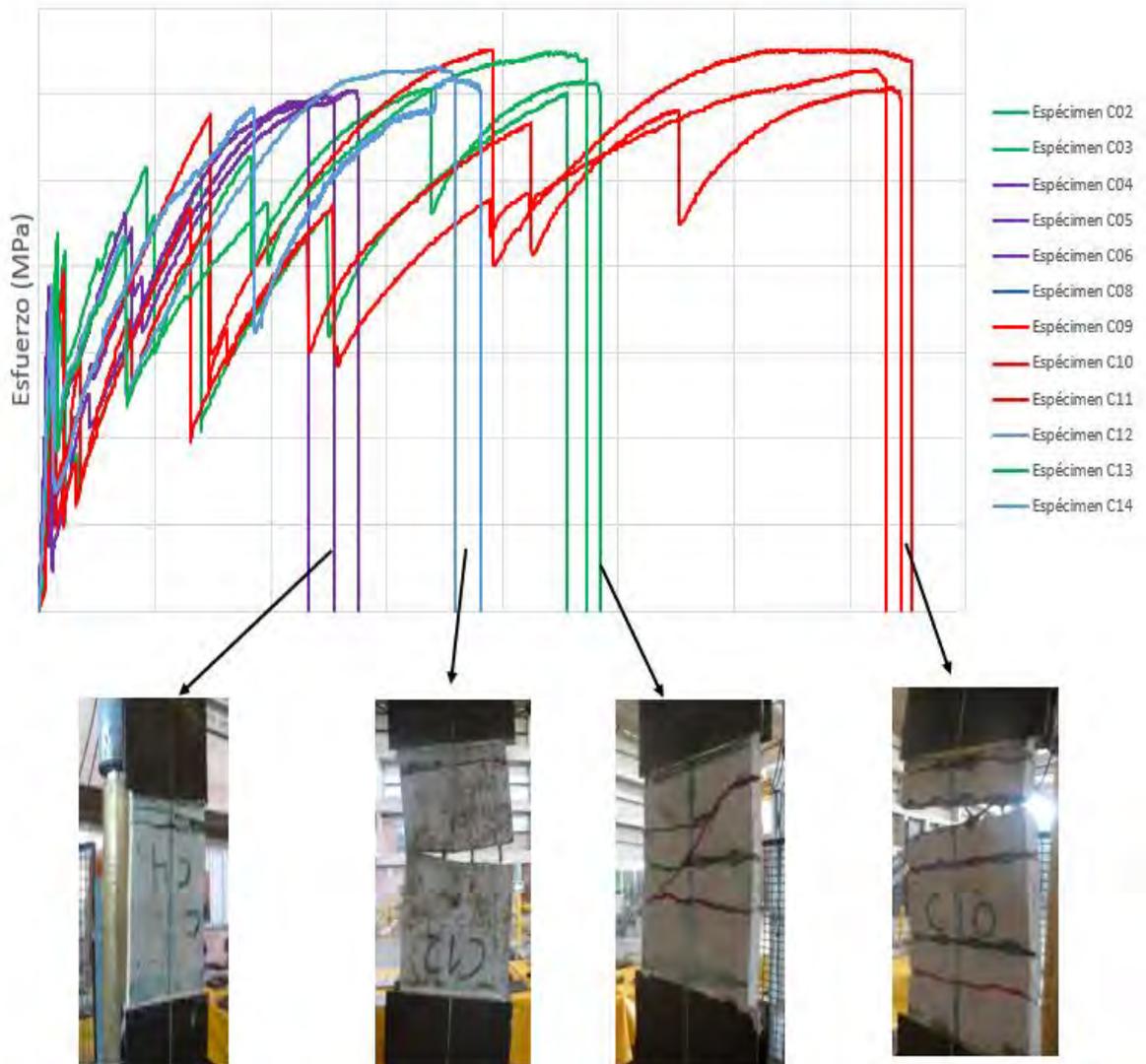


Figura 36-Esfuerzo vs deformación unitaria

Lo que se busca durante el ensayo es que todas las muestras se comporten como el grupo 4, donde desarrolló la mayor cantidad de fisuras liberando energía. Este comportamiento logra aumentar su propiedad de la pseudo – ductilidad, logrando mayor deformación gracias a las articulaciones formadas por las fisuras, la cual permite que la longitud de la geomalla trabaje.

Para la construcción de la curva bilineal recomendada por el AC434, se dividirán en 2 tramos. El primer tramo consta del estado elástico del material antes de la primera fisura; y el segundo tramo consiste en la zona plástica del compuesto, la cual posee un módulo de elasticidad debido al aporte de la geomalla. Para conseguir los esfuerzos se usará la siguiente ecuación utilizando como sección transversal solo el área de la geomalla.

$$\sigma = \frac{P}{A * W}$$

Donde:

σ = Resistencia a la compresion (MPa)

P = Carga (N)

A = Area de una columna de geomalla (mm²)

W = Número de columnas en un espécimen

Con el fin de construir el primer tramo, necesitamos un módulo de elasticidad representativa de los ensayos ejecutados. Por esto, se debe obtener el módulo de elasticidad de cada espécimen ensayado y estadísticamente obtener el valor característico. Sin embargo, como se observa en el Gráfico 8 Gráfico 7, las zonas elásticas de los especímenes no poseen completamente una linealidad pura. Por esta razón, es necesario hacer una regresión lineal en la zona elástica a cada ensayo. La Tabla 5.5 muestra los valores obtenidos luego de hacer la regresión lineal a cada ensayo, dando como

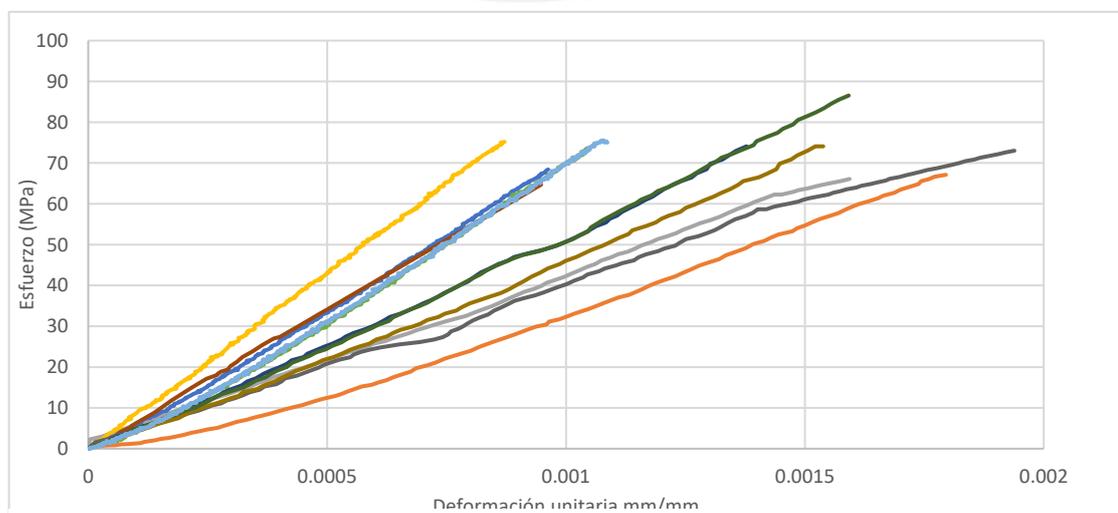


Gráfico 8 Zona Elástica de los especímenes ensayados

coeficiente de determinación por encima del 95%, es decir que los valores poseen un buen ajuste lineal.

El Gráfico 9 muestra la zona elástica de los 11 Módulos de Elasticidad obtenidos con el método de regresión lineal, calculamos el valor promedio y los valores extremos que nos asegura una confiabilidad del 68%. Estos valores se pueden observar en las tablas 12 y 13; y en el Gráfico 10 el rango que abarca. Para nuestro modelo de curva bilineal se tomará el valor promedio del módulo de elasticidad.

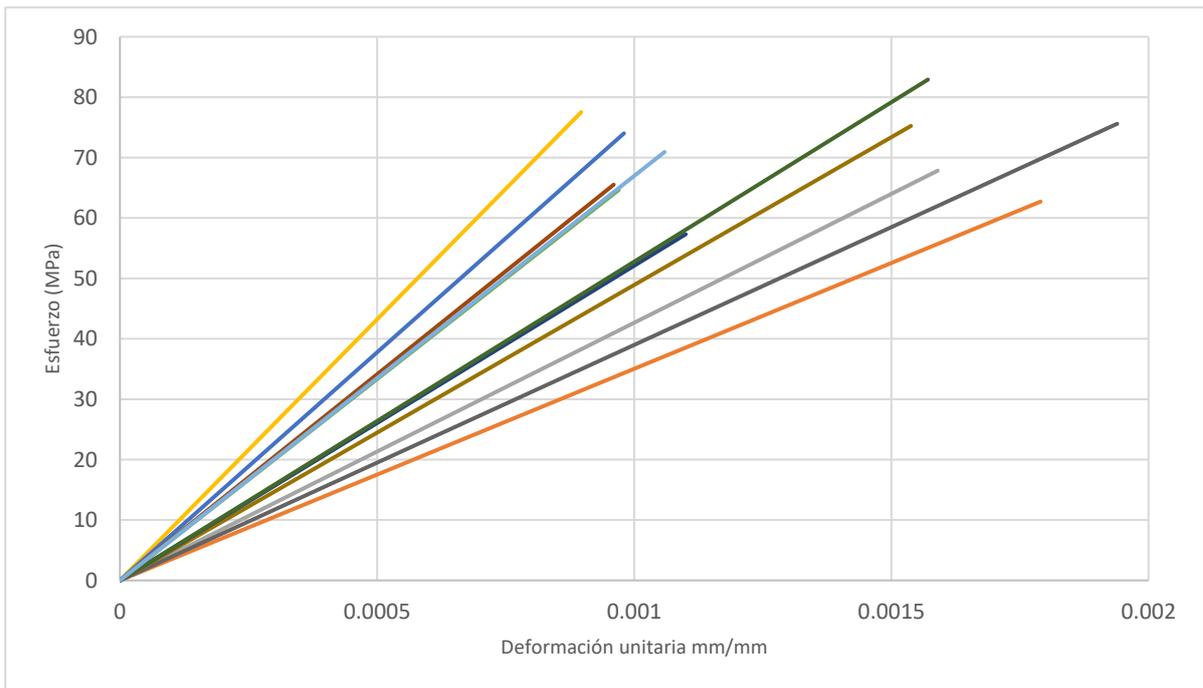


Gráfico 9 Zona Elástica de los especímenes con regresión lineal

Tabla 12 Valores del módulo de elasticidad

Especímenes	Módulo de Elasticidad(Gpa)	Desviación Estandar	Coefficiente de Correlación
E-C02	35.03	3.38	0.97
E-C03	42.66	0.96	0.99
E-C04	86.44	0.45	0.99
E-C05	75.52	3.89	0.99
E-C06	66.65	2.64	0.99
E-C09	68.24	7.92	0.99
E-C10	38.99	2.01	0.99
E-C11	48.92	2.51	0.95
E-C12	52.10	0.96	0.99
E-C13	52.78	1.45	0.99
E-C14	66.97	2.43	0.99

Tabla 13 Valores estadísticos de los Módulos de Elasticidad

Especímenes	Módulo de Elasticidad(Gpa)	Media	Desviación Estandar	$X-\sigma$	$X+\sigma$
E-C02	35.03	57.66	16.83	40.84	74.49
E-C03	42.66				
E-C04	86.44				
E-C05	75.52				
E-C06	66.65				
E-C09	68.24				
E-C10	38.99				
E-C11	48.92				
E-C12	52.10				
E-C13	52.78				
E-C14	66.97				

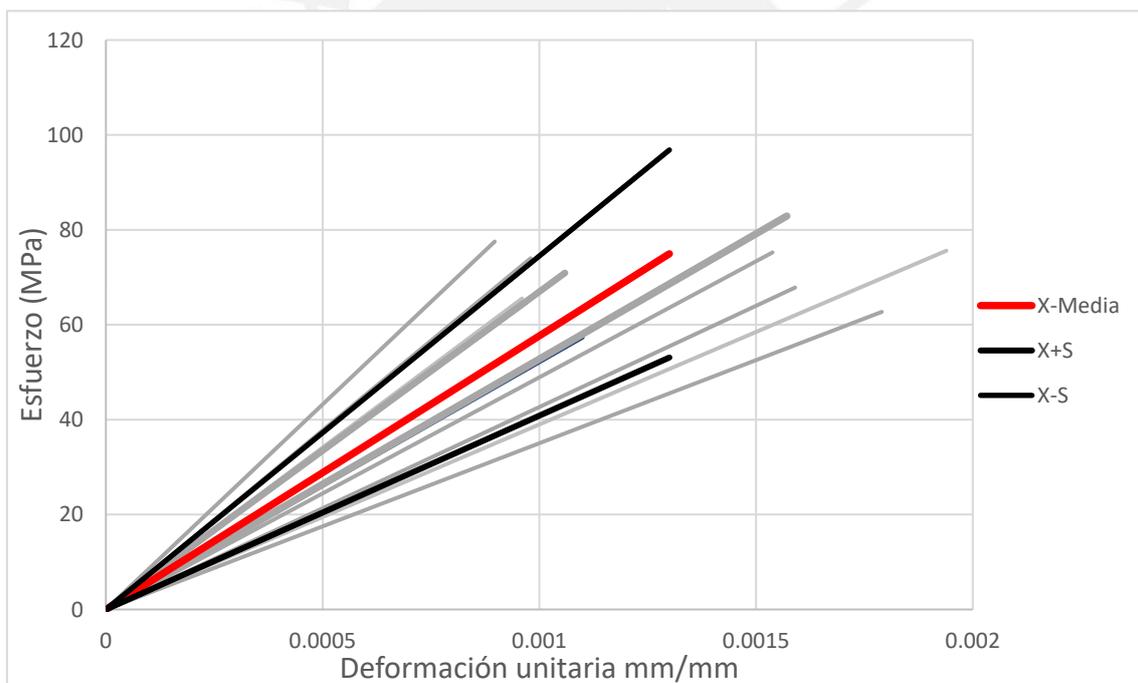


Gráfico 10 Curvas representativas de los Módulos de Elasticidad

El cálculo de la rigidez del FRCM después de la fisura se tomó como referencia los puntos 60 y 90 % de la deformación total para calcular la pendiente, tal como sugiere el AC434. Debido a que existe caídas por cada aparición de las fisuras, para un valor del 60% o 90% de la deformación última tendrá más de un esfuerzo correspondiente a esta deformación. A fin de seleccionar solo un valor se propuso lo siguiente:

-Tomar la pendiente que encierre un total de energía (área trabajada) similar al original.

-Seleccionar la recta que tenga similar pendiente que la región inelástica o elástica de la geomalla, considerando que en dicho estado la geomalla predomina el comportamiento del FRCM.

El Gráfico 11 muestra las dos curvas (elástico y plástico) representativas de uno de los ensayos. En la Tabla 14 se observa los resultados de la rigidez del estado inelástico de los 11 ensayos.

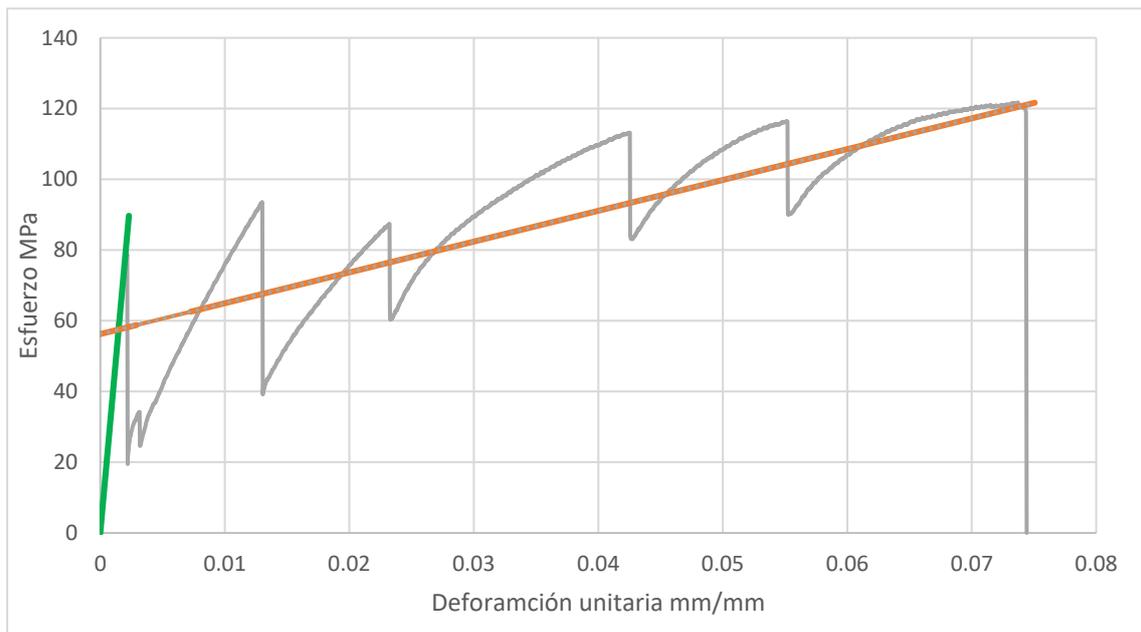


Gráfico 11 Curva bilineal representativo

Tabla 14 Valores del Módulos de Elasticidad para la geomalla.

Especímenes	Módulo de Elasticidad E2(Gpa)	Media	Desviación Estándar	X-σ	X+σ
E-C02	1.08	1.87	0.97	0.90	2.84
E-C03	1.25				
E-C04	3.35				
E-C05	3.34				
E-C06	2.73				
E-C09	0.89				
E-C10	0.87				
E-C11	1.14				
E-C12	2.65				
E-C13	1.55				
E-C14	1.70				

Con el propósito de construcción de la curva bilineal representativa de los 11 especímenes ensayados, se tomaron los valores promedios de cada estado; y el punto de transición como intersección de ambos módulos de elasticidad (elástica y plástica). El Gráfico 12 muestra el resultado de este análisis y la Tabla 15 sus principales características.

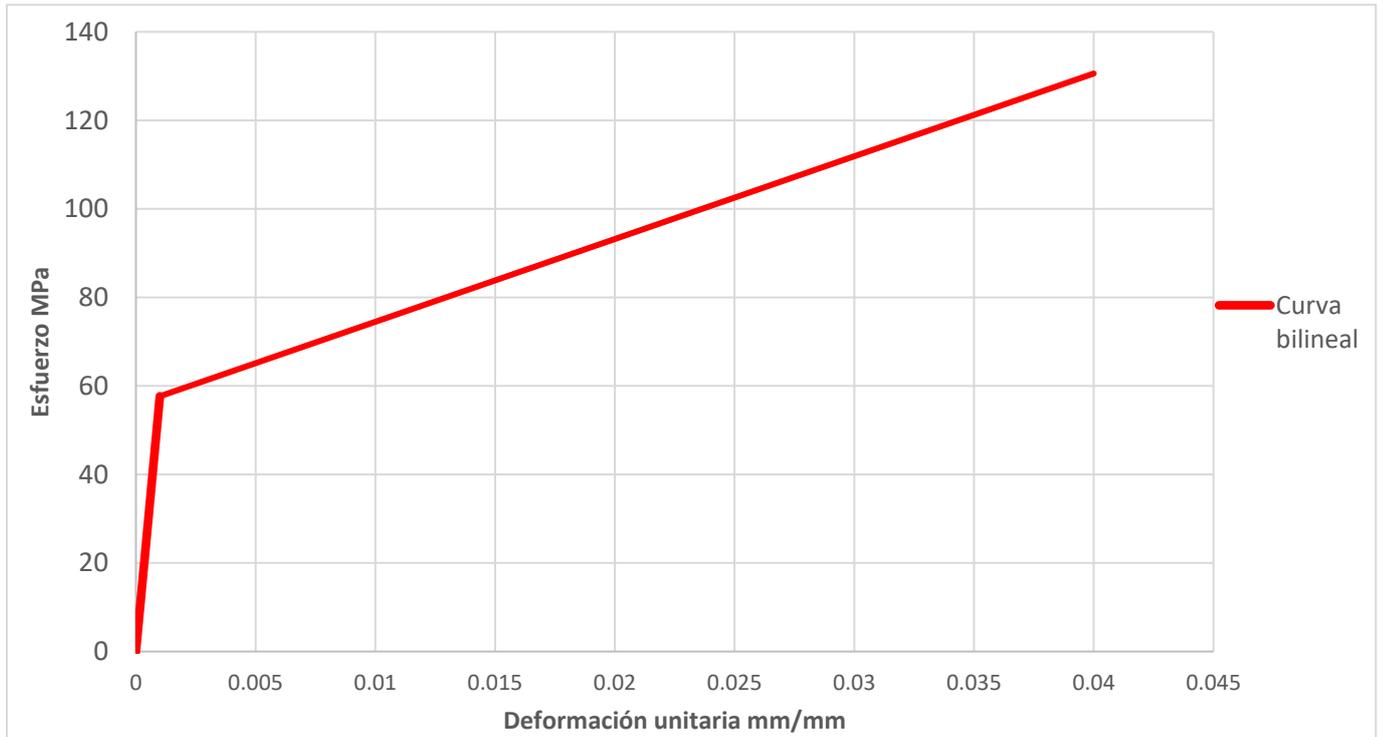


Gráfico 12 Curva bilineal de los 11 especímenes

Tabla 15 Características de la curva bilineal

Módulo de Elasticidad 1 (Gpa)	Módulo de Elasticidad 2 (GPa)	Punto de transición		Deformación última(mm/mm)	Resistencia Última(MPa)
		Deformación Unitaria(mm/mm)	Resistencia (MPa)		
57.66	1.87	0.001	58	0.04	130

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación tuvo como enfoque describir el comportamiento mecánico del sistema compuesto FRCM sometida a tracción pura. Además, obtener una curva característica basándose en dos tramos diferenciados por un módulo elástico antes de la primera fisura y otro módulo elástico después de la primera fisura. Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se llegó a las siguientes conclusiones:

Los materiales que conforman el sistema FRCM muestran su influencia durante el ensayo. En primer lugar, la matriz cementicia y la geomalla trabajan en conjunto antes de la primera fisura. Después de la aparición de la primera fisura la geomalla toma toda la carga y esta lo transmite a la interfaz geomalla-matriz. La interfaz se encarga de repartir nuevamente los esfuerzos hacia la matriz y la geomalla. Por esto, se presenta varias fisuras durante el ensayo, es decir que la matriz sigue trabajando luego de la primera fisura debido al mecanismo de trabazón de la geomalla, la cual impide que la geomalla resbale del mortero. Además, como era de esperarse la resistencia de los FRCM con geomallas traslapadas fueron mayor que las continuas, esto también nos da como evidencia que a mayor área transversal del refuerzo embebido mayor será la resistencia.

La mayoría de fisura que aparecieron durante el ensayo a tracción de los especímenes FRCM se localizaron aladañas y de forma paralela a las fibras transversales a la dirección de la fuerza de tracción. Estas fibras transversales no trabajan directamente aportando la resistencia al sistema, pero sí en la formación de mecanismo de trabazón. Las fibras transversales al no aportar resistencia al sistema se comportan como un poro de gran longitud, es por ello que se generan las fisuras aladañas a estas.

Uno de los grandes problemas que se tiene al ejecutar los ensayos a tracción es que algunas veces el espécimen y las lengüetas de metal no se encuentra completamente alineadas y centradas. Esto genera excentricidades y por consecuencias momentos que incrementa los esfuerzos en los extremos. En la Figura 37 se aprecia una fisura atípica a lo esperado, la forma diagonal que posee es debido a la excentricidad de la carga.



(a)

(b)

Figura 37-Fisura atípica a lo esperado debido a la excentricidad de la carga tensión aplicada

Las caídas de carga que aparecen en los gráficos de esfuerzo vs deformación no son en su totalidad la representación de cada aparición de fisuras, ya que cabe la posibilidad de que estas caídas se generan por el reacomodo del espécimen cuando se tensa. Por esta razón, se debe observar y marcar detenidamente cada aparición de fisura con cada caída de carga, para así lograr evidenciar que caída de carga pertenece a un reacomodo.

Respecto a la curva bilineal del sistema, no es posible construir con la simple caracterización de cada componente individual. El comportamiento durante y antes de la zona elástica se ve influenciada por cada elemento, una de ellas son las fuertes caídas que tienen.

Para un siguiente estudio con los datos obtenidos de la curva bilineal se podría diseñar y calcular la resistencia que aporta este sistema hacia los muros de albañilería, y corroborar con unos ensayos a corte y a flexión. Además, se podría estudiar por qué en algunos ensayos a tracción aparecieron gran cantidad de fisuras mientras que en otros no.

ANEXO A

Calculo de la longitud de agarre entre lengüeta y espécimen

Para el cálculo de la distancia de agarre se consideró el uso del adhesivo SOLDIMIX EXTRA FUERTE. De acuerdo con las especificaciones del adhesivo, este se adhiere a todo tipo de materiales, incluidos metales y concreto. Además, de acuerdo con el fabricante la resistencia a la tracción del pegamento, luego de 24 horas es, al menos, 2000 lb/in².

También, se asumió que la malla usada alcanzara una resistencia última a la tensión de, como máximo, 920 lb/ft, que es la resistencia MARV de mallas similares proporcionada por el fabricante. Este valor se verificará con los ensayos de resistencia de la malla.

Entonces, usando las dimensiones de la tabla 1.4, la longitud de agarre se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$l_a = \frac{920}{12} * \frac{132}{25.4} * \frac{1}{\frac{132}{25.4}} = 0.038 \text{ pulg} = 0.97 \text{ mm} \approx 1 \text{ mm}$$

Del cálculo, se obtuvo que la distancia de agarre necesaria es aproximadamente 1mm. Sin embargo, se usará una distancia de agarre de 4 cm para este caso práctico.

REFERENCIAS

- Tobriner S., M.EERI (1984). A History of Reinforced Masonry Construction Designed to Resist Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 1(1), 126-49
- Car E., Oller S., Oñate E. (2000). Tratamiento Numérico de Materiales Compuestos. Monografía No.57. Barcelona, España. Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE)
- Obraztsov, I. F., & Vasilev, V. V. (1982). Mechanics of composites. (Translation of *Mekhanika kompozitnykh sred*, Moscow, Izdatel'stvo Mir, 1982) Moscow, Mir Publishers, 1982, 280.
- Mobasher, B. (2011). Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites. CRC press.
- Arboleda, D. (2014). Fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites for infrastructure strengthening and rehabilitation: Characterization methods.
- Carozzi, F. G., Colombi, P., Fava, G., & Poggi, C. (2016). A cohesive interface crack model for the matrix–textile debonding in FRCM composites. *Composite Structures*, 143, 230-241.
- Weiland, S., Ortlepp, R., Brückner, A., & Curbach, M. (2007). Strengthening of RC structures with textile reinforced concrete (TRC). Thin fiber and textile reinforced cementitious systems, 157-172.
- Mazoni, E., Dusi, A., & Mezzi, M. (2008, Octubre). Polymeric Grid for a Cost Effective Enhancement of The Seismic Performance of Masonry Buildings. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China.
- Salinas, R., Lázares F. (2007). La albañilería tubular y su uso en viviendas en zonas sísmicas. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería-Centro Peruano Japonés de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres.
- Quispe M. (6 de abril de 2013). El 60% de las viviendas en el Perú se edifican con el autoconstrucción. La República. Recuperado de <https://larepublica.pe/economia/702544-dos-tercios-de-casas-del-pais-son-de-autoconstruccion>.

- San Bartolomé (2011). Reparación y reforzamiento de un muro de albañilería confinada mediante fibra de carbono. Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de <http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/82/2011/08/Reparacion-fibra-de-carbono.pdf>.
- Donnini J., Corinaldesi V., Nanni A. (2016). Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. *Composites Part B: Engineering*, 88, 220-228
- Papanicolaou, C., Triantafillou T., Karlos K., Papathanasiou, M. (2007). Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading. *Material and Structures*, 40(10), 1081-1097
- Sandoval P. (2014). Evaluación Experimental del Comportamiento Mecánico de Refuerzos de Fibra de Carbono con Matriz Cementícea (FRCM), Influencia del Tipo Matriz (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Chile.
- American Concrete Institute. (2004). Report on thin reinforced cementitious products. ACI 549.2R-04. Farmington Hills, USA
- American Concrete Institute. (2013). Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. ACI 549.4R-13. Farmington Hills, USA.
- American Concrete Institute. (2013). Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures. ACI 549.4R-13. Farmington Hills, USA.
- Babaeidarabad, S., De Caso, F., & Nanni, A. (2013). URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite Subjected to Diagonal Compression. *Journal of Composites of Construction*, 18(2), 1-9.
- ICC Evaluation Service, Inc. (2016, Junio). AC434 Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) And Steel Reinforced Grout (SRG) Composite Systems.

Industrial Beta (s/f). SOLDIMIX EXTRAFUERTE (ACERO PLÁSTICO).

<http://soldimix.pe/wp-content/uploads/sites/5/2017/03/HOJA-TECNICA-SEF-1.pdf>.

Consulta: 15 de noviembre de 2017.

Koerner, R. M. (2012). Designing with geosynthetics (Vol. 1). Xlibris Corporation.

Montesi, M. (2015). INVESTIGATION OF INTERLAMINAR SHEAR BEHAVIOR OF FABRIC REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX (FRCM) COMPOSITE SYSTEMS. Milano, Italia: POLITECNICO DI MILANO School of Civil and Environmental Engineering.

San Bartolomé, Á., Quiun, D., & Silva, W. (2011). Diseño y construcción de estructuras sismorresistentes de albañilería. Lima: Fondo Editorial PUCP.

Sofronie R, Editor, Applications of Reinforcing Techniques with Polymer Grids for Masonry Buildings, Report N°5 Cooperative Advancement in Seismic and Dynamic Experiments, Laboratório Nacional de Engenharia Civil Lisboa, Portugal, 2005.

Torrealva D, Dusi A, Structural Polymer Grid Reinforcement for Brick Masonry Walls – The Ductile Approach, 10th North American Masonry Conference, St. Louis, Missouri, USA, 3-6 June 2007.