

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MUROS DE
MAMPOSTERÍA REFORZADOS EXTERNAMENTE CON FRP BASADO EN EL
ANÁLISIS DE MODELOS HISTÓRICOS: ESTADO DEL ARTE

HOMER ARMANDO BUELVAS MOYA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTADO DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MUROS DE
MAMPOSTERÍA REFORZADOS EXTERNAMENTE CON FRP BASADO EN EL
ANÁLISIS DE MODELOS HISTÓRICOS: ESTADO DEL ARTE

HOMER ARMANDO BUELVAS MOYA

Trabajo de Grado para optar al
Título de Ingeniero Civil

DIRECTOR
Ingeniero OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO
Profesor asociado a la Universidad Industrial de Santander

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTADO DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012

A Dios por brindarme fortaleza y derramar bendiciones sobre mi camino.

A mis padres, abuela, hermanos y familiares, quienes me han acompañado y apoyado en este proceso de formación profesional.

A Lina, quien estuvo a mi lado en mis mejores decisiones y logros académicos.

Y a los amigos de siempre y a los nuevos que me brindaron su amistad y cooperación personal y académica.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la colaboración del profesor Oscar Begambre, por apoyarme en esta investigación, además de sembrar en mí el gusto por la ingeniería estructural.

Agradezco a Javier Jaramillo por guiarme y fundar en mí las bases estructurales de este trabajo de grado, y en general a todos los que me acompañaron en el camino de muchos obstáculos que significo el realizar el mismo.

Finalmente agradezco a mi madre, María Moya, por incentivar me a estudiar en la Universidad Industrial de Santander, y sobre todo a mi padre, Edgardo Buevas, por confiar en mí y apoyar cada decisión en esta etapa decisiva de mi vida.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS.....	18
1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	19
1.1 Comportamiento Mecánico de Muros de Mampostería Simple y con FRP	19
1.1.1 Muros de Mampostería Simple	19
1.1.2 Muros de Mampostería Reforzados Externamente con FRP.....	23
1.2 Modelos de Muros de Mampostería Reforzados Externamente con FRP.....	28
1.2.1 Modelos Experimentales.....	29
1.2.2 Modelos Numéricos	31
2. ANÁLISIS DE MODELOS HISTÓRICOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS EXTERNAMENTE CON FRP	36
2.1 Simulaciones Experimentales	36
2.1.1 Modelos Simples de Mampostería con Láminas de CFRP	36
2.1.2 Adaptación de Mampostería Reparada con CFRP	39
2.1.3 Refuerzo de Mampostería de Tufa con CFRP	42
2.1.4 Confinamiento de Mampostería con FRP	45
2.1.5 Mampostería Reforzada Externamente con Telas de CFRP	48

2.1.6	Capacidad Cortante de la Mampostería Reforzada con Laminas GFRP..	51
2.1.7	Resistencia Sísmica de la Mampostería Reforzada con FRP.....	53
2.2	Simulaciones Numéricas	57
2.2.1	Modelación Numérica de Mampostería Reforzada con Compuestos	57
2.2.2	Falla a Compresión de Modelos de Mampostería Reforzada con FRP	61
2.2.3	Respuesta a Flexión de la Mampostería Reforzada con Compuestos	64
2.2.4	Homogeneización de Modelos de Mampostería Reforzada con FRP	67
2.2.5	Simulación Numérica de Mampostería Reforzada con FRP (PET)	71
2.3	Comportamiento del Sistema Muro-FRP según los Modelos Históricos	75
2.3.1	Comportamiento Mecánico y Desempeño del FRP	75
2.3.2	Descripción de los Modos de Falla Según la Condición de Carga	77
3.	CONCLUSIONES.....	83
4.	RECOMENDACIONES	86
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	ANEXOS.....	93

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Modelos experimentales analizados en este estudio.....	30
Tabla 2. Modelos numéricos analizados en este estudio.....	35
Tabla 3. Resumen de las características principales de los modelos.....	76
Tabla 4. Resumen del comportamiento límite de los modelos experimentales.....	80
Tabla 5. Resumen del comportamiento límite de los modelos numéricos.....	81
Tabla 6. Resumen del desempeño del FRP como refuerzo en los modelos históricos.....	82

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Condiciones de cargas típicas de los muros de mampostería...	21
Figura 2. Fallas típicas de la mampostería simple.....	22
Figura 3. Esquema local de las fallas en la mampostería.....	23
Figura 4. Micromodelamiento de la mampostería con FRP y detalles de la simulación de las láminas de FRP.....	33
Figura 5. Modelos y Configuraciones de Laminado.....	37
Figura 6. Pruebas en muros con CFRP: de cortante por cargas laterales y flexión fuera del plano.....	40
Figura 7. Colocación externa del refuerzo CFRP y modelo de la prueba a compresión diagonal.....	43
Figura 8. Tipos de muros de los modelos experimentales.....	46
Figura 9. Modelos fallados, las líneas azules y rojas se diferencian por la diagonal de propagación.....	49
Figura 10. Configuración del modelo y del refuerzo.....	52

Figura 11. Falla en la base de los modelos experimentales.....	55
Figura 12. Modelo discretizado a compresión y configuraciones compresión diagonal de la mampostería.....	58
Figura 13. Etapas de la homogenización de la mampostería con FRP.....	62
Figura 14. Configuraciones de los modelos tratados: tipo completo o con espacio central.....	63
Figura 15. Comportamiento del laminado FRP a flexión fuera del plano y modelo numérico con refuerzo a tensión.....	65
Figura 16. Modelo numérico basado en las pruebas de MOSALLAM(2007)..	68
Figura 17. Modelos basados en las pruebas de CHONG et al. (1997).....	69
Figura 18. Tipo de Falla de los modelos experimentales.....	73
Figura 19. Curva esfuerzo-deformación de algunos tipos de fibra de FRP.	74
Figura 20. Tipos de fallas más comunes de los muros reforzados externamente con FRP más su deslaminación.....	79

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A – BASES TEÓRICAS REFERENTES A LA MAMPOSTERÍA.....	93
ANEXO B – BASES TEÓRICAS REFERENTES A LOS POLIMEROS REFORZADOS COM FIBRA.....	101
ANEXO C – BASES TEÓRICAS REFERENTES A LOS MODELOS EXPERIMENTALES.....	108
ANEXO D – BASES TEORICAS REFERENTES A LOS MODELOS NUMERICOS.....	110

GLOSARIO

FRP: Siglas en inglés para “Polímeros Reforzados con Fibra”.

MODELOS HISTÓRICOS: simulaciones físicas (experimentales) o computacionales (numéricas) establecidas a través del tiempo para comprobar una teoría anteriormente planteada o una hipótesis reciente.

POLÍMEROS: sustancia formada por una cantidad finita de moléculas (monómeros) que le confieren un alto peso molecular y propiedades físicas específicas.

ANISOTROPÍA: propiedad de un material que permite que su comportamiento físico (elasticidad, resistencia, etc.) varíe según la dirección en que son examinados.

ISOTROPÍA: propiedad de un material que permite que su comportamiento físico no dependa de su dirección examinada.

ORTOTROPÍA: propiedad de anisotropía que depende de las direcciones de sus ejes ortogonales de referencia.

ADITIVOS: componentes en forma de polvo o de líquido, que se encargan de modificar las propiedades de los materiales conglomerados en estado fresco.

ESPÉCIMEN: muestra o ejemplar que conforma una medida representativa de una clase de objetos o entidades físicas.

RESUMEN

TITULO

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS EXTERNAMENTE CON FRP BASADO EN EL ANÁLISIS DE MODELOS HISTÓRICOS: ESTADO DEL ARTE*

AUTOR

BUELVAS MOYA, Homer Armando**

PALABRAS CLAVES

Muros de Mampostería, FRP, Modelos Experimentales, Modelos Numéricos, Aplastamiento, Tensión Diagonal, Agrietamiento, Deslaminación.

DESCRIPCIÓN

Este estudio está basado en el estado del arte de algunas de las simulaciones experimentales y numéricas presentadas a través del tiempo, que exponen el comportamiento mecánico de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP (siglas en inglés para: polímeros reforzados con fibra), específicamente su tipo de falla según las condiciones de cargas más comunes y su modo de colapso final. Analizando y resumiendo además los elementos estructurales que componen estos sistemas y el desempeño del FRP como refuerzo externo alternativo.

Se relacionan, describen y analizan siete modelos experimentales (de 1998 al 2006) y cinco numéricos (de 2006 al 2011), estructuras compuestas por ladrillos de resistencia típica y pega exclusiva de mortero, así como con refuerzo FRP con matriz de resina epoxi y fibra de carbón o vidrio. Encontrándose que en las simulaciones de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP el modo de falla depende principalmente del tipo de carga soportada por estos sistemas, cuando exista compresión de los muros se resalta el aplastamiento, a cortante la falla a tensión diagonal o el deslizamiento, a flexión el deslizamiento y/o aplastamiento, y cuando se haga presente la flexión fuera del plano es común que se dé agrietamiento en la mitad del muro, destacándose siempre el efecto de deslaminación presente en el colapso de este tipo de estructuras y comparando los análisis con los modelos simples de mampostería y la teoría disponible sobre el tema.

Por medio del análisis de las simulaciones se demuestra principalmente los grandes beneficios de resistencia y deformación que le brinda el FRP a los muros de mampostería, dependiendo de la disposición del laminado (completo o por bandas), dirección de las fibras principales y adhesivo adecuado (resina epoxi).

* Trabajo de Grado

** UIS, Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Oscar Javier Begambre Carrillo.

ABSTRACT

TITLE

STUDY OF THE MECHANICAL BEHAVIOUR OF MASONRY WALLS EXTERNALLY REINFORCED WITH FRP BASED ON THE ANALYSIS OF HISTORICAL MODELS: STATE OF ART*

AUTHOR

BUELVAS MOYA, Homer Armando**

KEYWORDS

Masonry Walls, FRP, Experimental Models, Numerical Models, Crush, Diagonal Tension, Cracking, Delamination.

DESCRIPTION

This research is based on the state of art of some of the experimental and numerical simulations presented over time, which have exposed the mechanical behavior of masonry walls externally reinforced with FRP (fiber reinforced polymer). Analyzing and summarizing the structural elements, the failure mode according to the load conditions and the performance of the FRP like an alternative type of reinforcement.

Seven experimental models (from 1998 to 2006) and five numerical simulations (from 2006 to 2011) were described and analyzed, they are composed of typical resistance brick and mortar with reinforcement of FRP-epoxy system with carbon or glass fiber. It was found that the failure modes principally depend on the load supporting by the simulation of masonry walls externally reinforced with FRP. It was presented the crushing by the compressive failure, the diagonal tension or slip by the shear failure, the same slip or crushing by the bending failure, and the cracking by the outside flexion failure, emphasizing the always visible effect of delamination in these types of structures and its comparison with a previous theoretical revision and the unreinforced masonry walls modes of failure.

In addition, with these simulations, it was demonstrated the great benefits on strength and deformation of the FRP-Masonry systems, all of it depending of the type of reinforcement (bands or full), principal fiber direction and the correct anchorage (epoxy adhesive).

* Work Degree

** UIS, Faculty of Physical-Mechanical Engineering, Civil Engineering School, Director: Oscar Javier Begambre Carrillo

INTRODUCCIÓN

La mampostería es la técnica de construcción basada en el uso de unidades solidas aglomeradas unas sobre otras para formar elementos estructurales con formas geométricas que permitan crear edificaciones estables y funcionales, capaces de soportar ciertas condiciones físicas. Esta forma de construcción es aplicada desde hace cerca de diez mil años por los primeros constructores de la humanidad, basándose en la unión y apilamiento manual de rocas unidas con barro para crear paredes, y consecuentemente, lugares de resguardo contra condiciones ambientales adversas. A partir de ese momento, la mampostería es considerada como un sistema constructivo sencillo y eficiente que ha hecho parte de miles de estructuras a través del tiempo y el cual posee un uso activo en la actualidad. Sin embargo, a pesar de sus condiciones de eficiencia, cuando es implementada puede afrontar varios problemas físicos relacionados con la sismicidad de la zona, deterioro de sus propiedades mecánicas en el tiempo y perdida de seguridad estructural, por lo cual puede requerir refuerzos adicionales (hierro, concreto y acero) que se encarguen de complementar su estabilidad y resistencia, asegurando la participación de la mampostería como parte eficaz de un sistema estructural.

La necesidad del hombre por la búsqueda de nuevos materiales con mayores beneficios en el reforzamiento de la mampostería en contra de los efectos perjudiciales del entorno, han conducido a los investigadores en el desarrollo de nuevas tecnologías eficientes para estos trabajos, la fibra y más exactamente *los polímeros reforzados con fibra (FRP)* representan una alternativa eficaz por sus características de fácil manipulación y aumento de resistencia que puede ofrecer a muchas estructuras mecánicas y civiles construidas en la actualidad. En consecuencia, se han implementado múltiples pruebas experimentales que han

ayudado a entender el comportamiento de dicho material, además de sus propiedades y beneficios como refuerzo estructural, desarrollándose buenas bases empíricas para su posterior estudio numérico e iniciar su implementación en algunas estructuras (FLORES, 2010).

El avance de un buen modelo experimental o numérico conduce a un mejor entendimiento del FRP como refuerzo en los muros de mampostería y ayuda a confirmar o refutar varias de las teorías que se tienen sobre este material y su funcionamiento estructural. Con el desarrollo de este trabajo de grado se busca elaborar un completo estado del arte sobre los modelos históricos más recientes y disponibles en el medio (simulaciones experimentales y numéricas) sobre el estudio del comportamiento mecánico de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP, y reseñarlos, incluyendo con detalles las propiedades de los elementos que lo componen y los tipos de fallas según las condiciones de cargas encontradas, para establecer unas bases claras sobre el comportamiento existente de la mampostería reforzada externamente con esta tecnología, además de sus ventajas físicas.

Esta investigación se enfocará inicialmente en la definición de las bases teóricas necesarias para entender los elementos que componen los muros de mampostería reforzados externamente con FRP, enfocándose en la definición de los modelos ingenieriles, las herramientas principales para la evaluación del problema. Repasando la breve teoría existente en el uso del FRP como refuerzo estructural en la mampostería, explicando su comportamiento y modelamiento general. Finalmente se realizará un análisis específico de los modelos estudiados (en orden cronológico) y un informe tabulado sobre el comportamiento típico de los muros de mampostería reforzados externamente con la tecnología FRP, teniendo en cuenta: elementos físicos, condiciones de carga, conducta y beneficios.

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar un estudio sobre el comportamiento mecánico de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP (Polímeros Reforzados con Fibra), fundamentado en el análisis de modelos históricos, experimentales y numéricos.

Objetivos Específicos

Ejecutar esta investigación de forma íntegra y en cumplimiento del objetivo general de este trabajo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los tipos de elementos más usados y su forma de acople, en la simulación del comportamiento de muros reforzados con FRP (conformado por bloques, pega, FRP y adhesivo).
- Describir los tipos de falla de los muros de mampostería con y sin refuerzo de FRP, sometidos a condiciones de cargas específicas y según modelos históricos.
- Analizar el desempeño del FRP como refuerzo externo de muros de mampostería, basados en modelos experimentales y numéricos

1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Esta investigación se fundamenta a partir de los conceptos básicos encontrados en la literatura y de las concepciones aplicables al objeto de estudio “el comportamiento de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP” en el campo de investigación “las simulaciones históricas” (referirse a los anexos para la definición en detalle de la mampostería, los polímeros reforzados con fibra (FRP), los modelos experimentales y los modelos numéricos).

1.1 Comportamiento Mecánico de Muros de Mampostería Simple y con FRP

Generalmente, la mampostería es diseñada para resistir cargas de compresión y cortante, pero en ningún caso se puede despreciar su comportamiento bajo cargas de flexión (en el plano o fuera de este), ya que cualquier muro está expuesto a múltiples tipos de esfuerzos ocasionados por la incertidumbre de los efectos externos a él. En este estudio se tiene en cuenta lo anterior para presentar un resumen teórico del comportamiento tipo de la mampostería simple y reforzada externamente con FRP (teoría disponible).

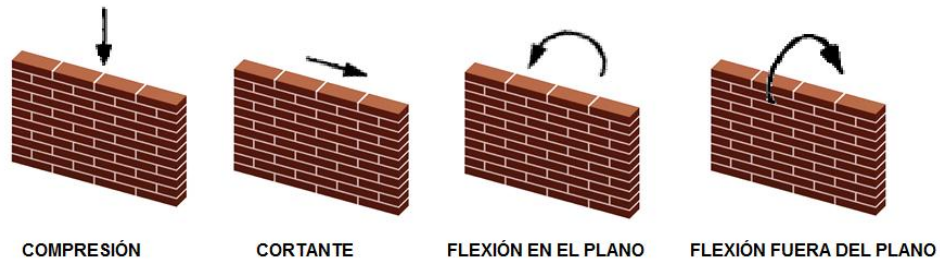
1.1.1 Muros de Mampostería Simple

La teoría plantea una conducta típica de la mampostería estructural bajo condiciones de carga específicas y por consiguiente un prototipo de falla para muros con diferentes relación longitud/altura (la falla más común se presenta en muros con longitud/altura mayor o igual a 2) que no tiene en cuenta

modificaciones pequeñas de material (siempre y cuando estos sean regidos por la norma), ni el fenómeno de reblandecimiento que solo se presenta bajo largos periodos de tiempo. Según Lourenço (LOURENÇO, 1998) y otros autores, el modo de falla de la mampostería depende principalmente del tipo de esfuerzos soportados, esta presenta un comportamiento lineal antes de fallar y no lineal después hacerlo. Si se presenta una pérdida de rigidez y resistencia rápida, la falla es de tipo frágil (esfuerzos cortantes y de tensión) y si la pérdida de rigidez y resistencia es gradual, la falla es de tipo dúctil (esfuerzos a compresión).

Teóricamente, cuando se somete a cargas ultimas en su plano, se cree que bajo *compresión* simple (siempre ensayos de compresión axial) (*Figura 1*) el mortero se expandiría como resultado de su aplastamiento por acción de las unidades sólidas, pero debido a la cohesión y fricción con estos mismos, el mortero no se expande y no falla (inicialmente), la falla real se produce principalmente en la interfaz (plano de unión) unidades-mortero (donde los esfuerzos sean mayores) debido a la poca resistencia de esta unión bajo cargas ultimas, causando compresión triaxial al mortero, además de tensión biaxial con compresión uniaxial en el ladrillo que generaría las fisuras futuras en él (la resistencia a compresión es fácil de calcular en la norma NSR-10 y teóricamente simple es dado por el menor valor entre la interfaz, mortero y unidades). Según esto, la falla a compresión se presenta por aplastamiento (*Figura 2*), el cual se define como la reducción violenta del grosor de los mampuestos (deformación transversal) por medio de una fuerza aplicada hasta provocar la pérdida de su forma original, principalmente se presenta en el mortero (ocasionada por la interfaz) y puede generar fisuración vertical en las unidades donde los esfuerzos de compresión sean mayores a los máximos, región donde generalmente se agrieta el muro y produce el colapso del mismo. En algunos casos extremos, donde los materiales sean altamente resistentes y la relación de espesor del muro entre la altura de ladrillo es grande se puede dar una falla por deslizamiento a compresión (principalmente en la base del muro).

Figura 1. Condiciones de cargas típicas de los muros de mampostería.



Por otra parte, cuando la mampostería está sometida a cargas laterales que generan *esfuerzos cortantes* (Figura 1), tampoco se genera un estado de esfuerzos uniformes, lo que induce también a depender de la resistencia de la superficie de interfaz en diferentes partes del muro (VIVIESCAS, 2009), generándose principalmente la falla de la estructura por tensión diagonal (Figura 2) o separación-agrietamiento de las juntas por la diagonal principal del muro. Esta se presenta por afectación de la fricción y la adherencia de las unidades con el mortero de pega, creando un aumento de esfuerzos cortantes en los planos de unión y por ende resultando en una separación de los materiales por estos en forma escalonada diagonal (misma propagación de la acción de la carga). En caso de presentarse la acción de tensión-cortante o flexo-cortante en la mampostería, la falla se puede presentar por agrietamiento cruzado en ambas diagonales del muro, mientras si el muro es esbelto, la falla se puede presentar por deslizamiento en la base (mayores efectos de la flexión). Los ensayos utilizados para la medición del cortante en la mampostería pueden ser por cargas laterales horizontales (estáticas y dinámicas) y por compresión diagonal (de resultados más conservadores de resistencia y deformaciones).

También se plantea el sometimiento de los muros a cargas últimas de *flexión* en el plano o fuera de este (Figura 1), la mampostería es sometida a esfuerzos de compresión, tensión y cortante en su estructura, entonces la resistencia última

depende del comportamiento más débil e igualmente de la interfaz mencionada. Presentándose generalmente fallas por deslizamiento en la base (gran cortante) o agrietamiento diagonal donde los esfuerzos generados por la curvatura del muro son máximos durante flexión en el plano (*Figura 2*), además de falla por agrietamiento en la mitad del muro o por aplastamiento (muy raro) durante flexión fuera del plano del muro.

Figura 2. Fallas típicas de la mampostería simple.

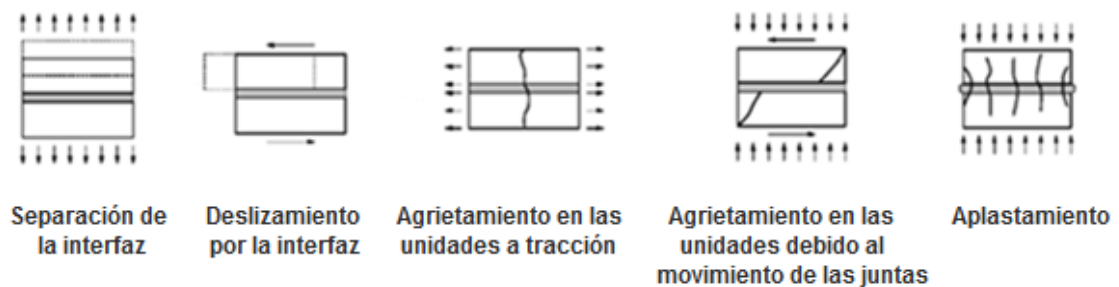


Fuente: Modificado de (MOLANO, 2005).

Formalmente se establece que la resistencia y la falla de la mampostería se determinan por la menor resistencia entre los mampuestos (unidades y mortero) y la unión mortero-unidades. La falla generalmente comienza por la interfaz de las juntas horizontales, pasando por una etapa inelástica hasta hacer fallar los ladrillos y los planos de unión de las juntas verticales, terminando con la pérdida de

estabilidad global de la mampostería (DARYUSH et al., 2009). Los mampuestos fallan individualmente según la carga (*Figura 3*), generando una debilidad estructural local que se propaga por toda la estructura y genera los tipos de fallas presentadas.

Figura 3. Esquema local de las fallas generales de la mampostería.



Fuente: Modificado de (VIVIESCAS, 2009).

1.1.2 Muros de Mampostería Reforzados Externamente con FRP

Para reforzar (y/o reparar) la mampostería y contrarrestar los efectos dañinos que en ella se pudieran presentar (o se han presentado), se han desarrollado múltiples sistemas alternativos que brinden aumento de resistencia y mejores ventajas que los procedimientos convencionales de hierro interno o externo, una de ellos ha sido la introducción de fibras en el mortero de pega (Técnica Near Surface-Mounted o NSM) o el reforzamiento de la sección con perfiles metálicos, técnicas altamente invasivas, sin embargo, los más usados son el reforzamiento externo con láminas de acero o con camisas de concreto lanzado, las cuales no requieren modificaciones internas de los muros, pero le agregan resistencia a estas estructuras a costa de aumento de peso y volumen. Actualmente el reforzamiento externo de la mampostería mediante láminas o telas de polímeros con fibra (FRP)

se ha traído a mención y aunque es una técnica con más de veinte años de práctica en la Ingeniería Civil, su uso levemente se está afianzando y por lo cual se presenta en la actual investigación.

Este estudio del FRP como refuerzo para la mampostería se justifica en la búsqueda previa de un material de mejores propiedades físicas que en la actualidad brindan el concreto, el hierro o el acero, y que pueda ofrecer igual o mejores propiedades mecánicas a los muros, sin tener inconvenientes de corrosión, invasión de la estructura, aumento de volumen y peso, daño arquitectónico, pequeñas relaciones resistencia/peso, alta humedad, resistencia al ataque químico o baja adherencia (mal anclaje). El FRP ha sido evaluado en el refuerzo y reparación de la mampostería mediante estudios experimentales, y aunque pocas son las certezas de su comportamiento *solo como refuerzo*, se han establecido algunas bases teóricas en lo que respecta a su uso sobre mampostería estructural cuando se presenta laminado externo de este compuesto en *toda* la superficie libre del material y por bandas cuando existe flexión, observando sus buenos beneficios físicos según las características mencionadas.

Según investigaciones teóricas anteriores (EHSANI y SAADATMANESH, 1996; EHSANI, 1997; SHRIVE et al., 2001; entre otros) se ha establecido que el comportamiento de la mampostería con FRP bajo *compresión* es muy similar al de los muros de concreto reforzado con este mismo material, aumentando la capacidad de carga axial y de deformación transversal de los mismos. La falla a compresión típica para estos casos de refuerzo es el vencimiento inicial de las uniones mortero-unidades y posterior falla del mortero (por aplastamiento), cuando este falla totalmente queda un compuesto unidades-FRP que mantiene la integridad transversal de la estructura, pero a partir de esta etapa y pese a la ganancia de resistencia, los muros no resisten nuevas deformaciones y se desprende el laminado del compuesto después de alcanzarse total agrietamiento de las unidades. La falla es regida por la alta estreches entre el laminado y las unidades resultando en el colapso cuando se presente deslaminación

(desprendimiento del laminado de FRP de la mampostería). A razón de esto, los polímeros reforzados con fibra aumentan la ductilidad, resistencia, y modifican el tipo de falla de la mampostería sometida a cargas de compresión.

Bajo cargas laterales que generen *cortante*, la mampostería reforzada externamente con FRP tiende a fallar como un muro simple (generalmente por tensión diagonal) y de manera frágil pero con algunos cambios en su comportamiento específico. El FRP aumenta en pequeña medida la rigidez y resistencia global de los muros, reduce el tamaño de las grietas generadas en los mampuestos e incrementa altamente su capacidad de deformación y ductilidad de la interfaz justo antes de la falla, lo que ocasiona un colapso menos destructivo que si no se contara con refuerzo. Sin embargo, la mampostería falla antes de que se alcance toda la capacidad mecánica del laminado de FRP que lo recubre, por lo cual se desperdician algunas de las ventajas físicas de este sistema y también es recomendable el uso de este material en forma de bandas cuando se cuente con muros a cortante.

Por su parte, cuando existen efectos de *flexión* de cualquier tipo sobre la mampostería, se presenta un aumento de la resistencia en los muros. Se expone agrietamiento en las zonas de tensión, aplastamiento en las zonas de compresión, deslizamiento si se generan esfuerzos cortantes adicionales y siempre presencia de la deslaminación. Los tipos de agrietamientos de las estructuras de mampostería en estos casos son similares con y sin refuerzo de FRP, pero bajo un restricto control de deformaciones con esta técnica de reforzamiento estructural, permitiendo un comportamiento no lineal debido a la fragilidad a tracción de los muros y presentando consecuentemente: deformaciones máximas, efectos de daño local, deslaminación y posterior colapso de la estructura.

1.1.2.1 Diseño Específico del FRP

Varios autores han calculado numéricamente el aporte del FRP a la resistencia total de las estructuras de mampostería basados en algunas normas de diseño, a continuación se presentan algunas de estas técnicas sencillas para el FRP de refuerzo en muros más comunes, sometidos a cortante y flexión (información extra pero no tenidos en cuenta para esta tesis), teniendo en cuenta que es una guía rápida para el ingeniero pero no sustituye la responsabilidad del mismo para analizar cada estructura de forma independiente y trabajar en conjunto con el fabricante del laminado de FRP para entender su comportamiento y utilizarlo hábilmente (algunos diseños son tomados de los modelos históricos estudiados en este trabajo de grado con el fin de complementar el estado de conocimiento que se cuenta sobre el diseño del FRP; esto fue realizado al final de la investigación).

- Según FyFe Co LLC (FYFE CO LLC, 2007). Resistencia suministrada por el FRP en ambos lados del muro (Cortante):

$$\phi V = (k) \phi^2 (t_f)(f_j)(H)(\sin^2 \theta) \quad [\text{kips}]$$

k = factor de eficiencia (0.75, 1, 2)

t_f = Espesor del FRP (in).

$f_j = \epsilon E_G$ (Esfuerzo garantizado).

$E_G = C_G E$ (Modulo de elasticidad garantizado).

ϵ = Deformación máxima de la sección del muro.

C_G = Factor de reducción ambiental.

E = Modulo de elasticidad del FPR (ksi).

H = Altura del muro (in).

$\phi = 0.85$ (Según ACI 318)

θ = Inclinación de la fibra principal del FRP.

- Según FyFe Co LLC (FYFE CO LLC, 2007). Resistencia suministrada por el FRP fibra en dirección vertical (Flexión):

$$\phi M = \phi (k)(A)(f)(j_d) \quad [\text{kips.pulg}]$$

k = factor de eficiencia (0.75, 1, 2)

A = Área de la lámina/tela de FRP (in²).

f = Esfuerzo de diseño del FRP (ksi) (calculado igual que f_j).

$j_d = t_w - a/2$

t_w = Espesor del muro.

a = Ancho de la zona a compresión.

$\phi = 0.9$ (Según ACI 318).

- Diseño en el trabajo de Gergely et al. (GERGELY et al., 1999). Resistencia suministrada por el FRP según la ACI 440 (Cortante):

$$V_f = (n_f)(E_f)(t_f)(\epsilon_f)(w_f/s_f)(\sin^2 \theta)(d_f)(\phi) \quad [\text{kN}]$$

n_f = Número de capas de FRP.

E_f = Modulo de elasticidad del FRP (GPa)

t_f = Espesor del laminado de FRP (mm).

ϵ_f = Deformación esperada en el FRP.

w_f = Ancho del laminado de FRP (completo) (mm)

s_f = Espacio horizontal entre láminas de FRP (mm).

d_f = Ancho del muro (mm).

θ = Inclinación de la fibra principal del FRP.

- Diseño en el trabajo de Faella et al. (FAELLA et al., 2004). Resistencia suministrada por el FRP según la Eurocode6 (Cortante):

$$f_{FRP} = (f_{vo}) + (0.9)(\rho_{FRP})(f_{fu}) \quad [\text{MPa}]$$

f_{vo} = Resistencia teórica del FRP (MPa).

ρ_{FRP} = Proporción del refuerzo de laminado FRP.

f_{fu} = Resistencia a tensión del FRP (MPa).

- Diseño del refuerzo según el trabajo de Elgawady et al. (ELGAWADY et al., 2006). Resistencia suministrada por el FRP según el ACI125 (Cortante):

$$F_{FRP} = (0.75)(\rho_h)(f_j)(t)(L)$$

ρ_h = Proporción del refuerzo de laminado FRP.

$f_j = 0.004E_{FRP} \leq 0.75 f_{FRP}$ (fuerza axial del FRP).

E_{FRP} = Modulo de Elasticidad del FRP.

f_{FRP} = Resistencia última a tensión del FRP.

t = Espesor del muro.

L = Longitud del muro.

1.2 Modelos de Muros de Mampostería Reforzados Externamente con FRP

Para el uso comercial de cualquier material constructivo se debe someter este a numerables pruebas de laboratorio que midan sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, eléctricas, etc. Pero para ser usado como refuerzo estructural, el respectivo material se debe someter a modelamientos más elaboradas (experimentales o numéricos) que aseguren el buen comportamiento mecánico (aumento de resistencia y ductilidad) de estos ante las condiciones de esfuerzos que será sometida la estructura que pretenden reforzar, para ello se presenta la siguiente sección introductoria, donde se establecen los tipos de modelos presentes en la literatura de la temática planteada como parte de la realización de un estado del arte, metodología de este estudio. Entonces se divide esta sección en modelos experimentales y modelos numéricos, sin embargo, simulaciones numérico-experimentales solo se plantean en la segunda parte, para no repetir su revisión histórica y debido a que la evaluación matemática es más importante en estos casos.

1.2.1 Modelos Experimentales

En el caso de la mampostería estructural reforzada con FRP, el desarrollo de una prueba práctica que aseguren sus beneficios requiere conocer múltiples parámetros, tales como: materiales de los bloques, pega y refuerzo, geometría del problema, pruebas a realizar, herramientas, equipos necesarios y comportamiento esperado. Con ellas se espera estudiar las ventajas sobre el comportamiento mecánico a cargas de cortante, compresión y flexión por medio de un buen ejercicio experimental.

Los materiales que conforman estos muros no han sido sinónimo de discusión, se ha contado con disponibilidad para hacer pruebas sobre cualquier tipo de bloques (macizos o perforados) y de morteros de pega, siempre y cuando sean los usuales para construir estructuras de mampostería a reforzar externamente y que estén regidos por la norma sismo-resistentes del país de investigación. El FRP por su lado, si ha sido un ente de discusión para los investigadores, se plantea que los materiales FRP deben ser usados para mampostería afectada por sismos y que los más usados serían los compuestos que contengan fibra de carbono o vidrio con matriz y adhesivos de resina epoxi, sin descartar que existen otros tipos de fibras y adhesivos en el mercado.

1.2.1.1 Revisión Histórica

Los modelos experimentales de los sistemas muro-FRP están sometidos a cargas de compresión, cortante o flexión, recopilándose cinco de los trabajos más recientes y dos de los más importantes del siglo XX (*Tabla 1*). Demostrando avances importantes en la temática y resultados sobre el comportamiento mecánico de las estructuras estudiadas (*la revisión más específica de estos modelos se realiza en el Capítulo 2*).

Tabla 1. Modelos experimentales analizados en este estudio.

Autor (es)	Año de Publicación	País de Origen	Carga Analizada	Variación del Modelo
TRIANAFILLOU	1998	Grecia	Flexión	Modelos Simples (elementos de mampostería)
GERGELY, VANDERGRIFT y YOUNG	1999	Estados Unidos	Cortante y Flexión	Muros Pre-fallados (Cargas Laterales)
FAELLA, MARTINELLI, NIGRO y PACIELLO	2004	Italia	Cortante	Mampostería de tufa (Compresión Diagonal)
KREVAIKAS y TRIANAFILLOU	2005	Grecia	Compresión	Mampostería Confinada
SANTA MARIA, ALCAINO y LUDERS	2006	Chile	Cortante	Cargas Cíclicas Laterales
WANG, CHAI, HUANG y ZHANG	2006	China	Cortante	Modelo Muro-Pilar-Muro de Mampostería
ELGAWADY, LESTUZZI y BADOUX	2006	Suiza	Cortante-Flexión	Efectos Sísmicos

1.2.2 Modelos Numéricos

En la ingeniería, los modelos numéricos son diseñados para mostrar el comportamiento lineal o no lineal de algunas estructuras, cuando se cuente con la información necesaria de materiales, geometría y demás condiciones tenidas también en cuenta en un modelo experimental, pero con la seguridad de soluciones más rápidas y menos costosas. Se resalta los programas que utilizan la técnica de elementos finitos como la solución numérica a los posibles modelos planteados en ingeniería, las soluciones sin computadora ya no son muy comunes (aunque tampoco descartadas) y por lo cual el aumento progresivo de confianza en los software en la actualidad. Para el análisis de la mampostería reforzada externamente con materiales compuestos se utiliza la técnica por elementos finitos, dividiendo las estructuras en un número considerable de elementos simples (hexágonos o tetraedros generalmente) con finitos grados de libertad para solucionarlas individualmente (reducir complejidad) y posteriormente resolver un conjunto completo (ÖZEN, 2006), la cantidad de elementos finitos aumenta la convergencia pero tiene un carácter ligeramente despreciable a la hora de determinar los resultados (CHANSAWAT et al., 2011). Con estos modelos se pretende conocer en detalle el comportamiento mecánico dentro del rango elástico y plástico, falla, ubicación de las partes de daño, deformaciones, acción del refuerzo y carga máxima resistente de dicha estructura. El análisis se realiza como lineal para formas no adecuadas de mampostería, pero para muros de formas sencillas se implementa el análisis no lineal más detallado, teniéndose en cuenta las características anisótropas de la estructura y ortótropas de los materiales que la componen (la fibra se puede suponer isótropa).

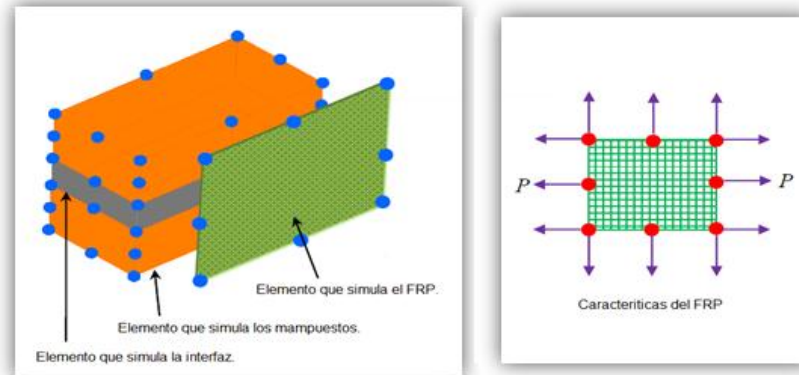
Los muros de mampostería son estructuras que se pueden modelar con cualquier tipo de simulación numérica (micromodelos o macromodelos) dependiendo del nivel de complejidad que se quiera analizar, si se quiere analizar el

comportamiento de los mampuestos una estructura con uno o varios muros, condiciones de contorno, estructura de la fibra, ancho de las láminas, etc.

Inicialmente, se plantean los micromodelos detallados de mampostería reforzada con FRP, en ellos se deben modelar tantos continuos como sea necesario (mortero de pega, unidades y láminas de FRP), las condiciones de contorno según el tipo de carga analizado y la conexión entre materiales, es decir, las discontinuidades, se deben simular a través de nodos (entre nodos comunes se unen áreas), esto para simular la unión como rígidas pero susceptibles a separaciones físicas (*Figura 4*). Se debe incluir todas las propiedades de cada uno de los materiales y la geometría necesaria, además de posiblemente sus mecanismos de fallas, agrietamiento de las uniones, deslizamiento de los planos de unión, agrietamiento de los bloques y aplastamiento del muro de mampostería. Estos micromodelos permiten entender en amplio detalle la incidencia de la fibra en la respuesta sísmica y mecánica de los muros, así como el comportamiento en detalle de cada uno de los elementos que los conforman por los que son muy buenos para entidades pequeñas como pozos o muros de vivienda, pero tan específicos que necesitan demasiados datos experimentales de todo el muro y de cada uno de sus componentes para definirlos, calibrarlos y comprobarlos (no es una opción de modelamiento muy realizada para la mampostería reforzada con FRP).

Los micromodelos simples se caracterizan por definir solo a las unidades de la mampostería y al refuerzo de FRP como continuidades, dejando como discontinuidad al mortero de pega (mezclándolo con la interfaz unidad-mortero) y al adhesivo que une el material compuesto con los muros (uniones por nodos). Estas simulaciones, requieren también de bastantes datos experimentales, pero son más realizables por los ingenieros, puesto que requieren menos modelamiento y capacidad de procesamiento para su solución (son recomendables para estructuras pequeñas y su uso en la modelación de mampostería reforzada con FRP es poco pero suficiente).

Figura 4. Micromodelamiento de la mampostería con FRP (izquierda) y detalles de la simulación de las láminas de FRP (derecha).



Fuente: Modificado de (RAHMAN y UEDA, 2011).

Los macromodelos por su parte son muy utilizados en la ingeniería para simular muchas estructuras de forma rápida y eficiente, no depende de muchos datos experimentales, pero si de un gran conocimiento analítico para proporcionar a un todo un resumen de propiedades de las entidades que lo conforman. Estos son apropiados para modelos grandes de mampostería reforzada externamente, en donde los esfuerzos a través de las juntas se consideran uniformes, además todo el conjunto se plantea como homogéneo (anisótropo), el cual es sometido a esfuerzos y deformaciones medias, tienen buen comportamiento general y de distribución de agrietamientos, pero con ellos, no se puede predecir los efectos locales en el mortero de pega y los bloques (ÖZEN, 2006), pero sí de todo el conjunto y posiblemente el de las láminas de refuerzo FRP (por su sencillez, estas simulaciones pueden ser no tan aproximadas por lo que son muy peligrosas de confiar si no se conoce profundamente del tema a modelar).

1.2.2.1 Revisión Histórica

Las simulaciones numéricas de la estructuras de mampostería con FRP, así como su escogencia de micro o macromodelos (sometidos a cargas de compresión, cortante o flexión) se recopilan en cinco trabajos analíticos recientes (*Tabla 2*). Demostrando avances importantes en la temática y conclusiones a tener en cuenta por los investigadores (*una revisión más específica de estos modelos se realiza en el Capítulo 2*).

Tabla 2. Modelos numéricos analizados en este estudio.

Autor (es)	Año de Publicación	País de Origen	Carga Analizada	Acompañamiento del Modelo
ROUGIER y LUCCIONI	2006	Argentina	Compresión y Cortante	(Micro) Análisis teórico y Modelo Experimental
MILANI, ROTUNNO, SACCO y TRALLI	2006	Italia	Compresión	(Homogéneo) Análisis teórico y Modelo experimental
HAMED y RABINOVITCH	2007	Israel	Cortante	(Micro) Análisis teórico
MILANI	2009	Suiza	Flexión	(Homogéneo) Modelos Experimentales de otros autores
RAHMAN y UEDA	2011	Japón	Cortante	(Micro) Modelo Experimental

2. ANÁLISIS DE MODELOS HISTÓRICOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS EXTERNAMENTE CON FRP

2.1 Simulaciones Experimentales

En el estudio de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP se han realizado numerosas pruebas experimentales sobre modelos de mampuestos desde los inicios de la década de los noventa, cuando el uso de este material como refuerzo aumento considerablemente. En esta parte del estudio se traen a alusión algunos de estos modelos más recientes disponibles para el investigador y que mejor describen el comportamiento del fenómeno en objeto (en orden cronológico), reseñando primero las generalidades de dichas simulaciones (modelos y materiales), resumiendo sus respectivos resultados y analizando el comportamiento obtenido (teniendo en cuenta que todos las simulaciones son comparadas con modelos de mampostería simple, el comportamiento esperado de la *Sección 1.1* y evaluando el desempeño del refuerzo).

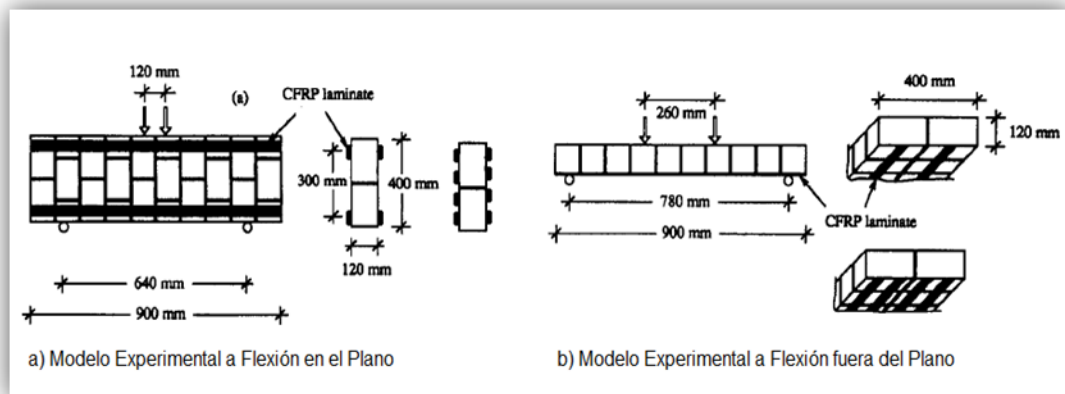
2.1.1 Modelos Simples de Mampostería con Láminas de CFRP

El trabajo de investigación experimental que lleva por título “Reforzamiento de Estructuras de Mampostería Usando Láminas de FRP con Unión Epoxi” realizado por Triantafillou (TRANTAFILLOU, 1998) es uno de los primeros en su clase, donde se prueban en laboratorio modelos de mampostería reforzada externamente con láminas de CFRP, con el fin de medir su comportamiento, los efectos de la unión Mampostería-FRP, las ventajas de este sistema y comprobar un análisis matemático previo hecho por el investigador en cuestión.

2.1.1.1 Resumen

Triantafillou (TRANTAFILLOU, 1998) construyó 12 especímenes a escala (con resistencia a la compresión de 3.57 MPa), seis para probar la flexión en su plano y seis para fuera del plano, conformados por ladrillos de arcilla perforados (resistencia a tensión de 1.57 MPa) y mortero de cemento, limo y agua (resistencia a la compresión de 5.4 MPa). Usando laminado de FRP con fibra de carbón (láminas de 50 mm de ancho con 1 mm de espesor), el cual para su aplicación requería previamente limpieza de la superficie objetivo por medio de aspiradora y acetona, pegamento con adhesivo epoxi solo sobre las unidades de la zona de ubicación basados en Lay-Up y protección con recubrimiento de láminas plásticas delgadas. Los ensayos fueron llevados a cabo en elementos contruidos a base de mampostería, no en muros como tal, pero eran los adecuados para medir los tipos de flexión requeridos (*Figura 5*).

Figura 5. Modelos y Configuraciones de Laminado.



Fuente: Modificado de (TRANTAFILLOU, 1998).

2.1.1.2 Resultados de Triantafillou (TRANTAFILLOU, 1998)

La falla general *en el plano* flexionado se presentó por deslaminación de FRP en las zonas con esfuerzos de tensión máximos seguido por aplastamiento en la parte a compresión, resaltándose que las láminas cerca de la base fueron las primeras en despegarse (apoyo simple). Por su parte, la falla general de la flexión *fuera del plano* fue por aplastamiento en las zonas donde la flexión ocasionaba compresión, resaltando que el FRP resiste pero no alcanzó su máxima deformación y resistencia en ninguna zona del muro.

Triantafillou (TRANTAFILLOU, 1998) concluyó que los polímeros reforzados con fibra aumentan considerablemente la resistencia de la mampostería a flexión (aproximadamente del 970% en los dos caso) siempre y cuando se utilice el número adecuado de láminas (siempre es mayor al necesario por cortante). *En el plano* la reacción de estos tipos de muros se requiere un número limitado de láminas cerca de donde se proveen serán los mayores esfuerzos (dos para esta prueba) y de un adhesivo lo suficientemente fuerte seria lo adecuado para permitir la actuación del FRP antes de un posible desprendimiento del mismo (este efecto puede ser evitado por anclajes metálicos sencillos). Mientras *Fuera del plano*, solo se analizó el efecto del FRP en la zona a tensión (donde se previó la falla inicial) y se determinó un valor mínimo para afectar el comportamiento de la mampostería (2 láminas, sino la falla será por agrietamiento a tensión), obteniendo un buen aumento de la resistencia general de la prueba, sin ocasionar daños en el laminado y generando la ya mencionada, falla por aplastamiento.

2.1.1.3 Análisis para el Estudio a Flexión

Las pruebas desarrolladas por Triantafillou (TRANTAFILLOU, 1998) muestran un considerable aumento de la resistencia de la mampostería reforzada con FRP, y a

pesar de que no es un modelo típico de los muros, centrándose en el análisis de la unión FRP-mampostería sin poder comparar totalmente con el comportamiento de muros simples, arroja resultados consistentes en el campo estudiado. Cuando existe *flexión* sigue rigiendo la resistencia a tracción del muro, por lo cual el agrietamiento sigue siendo la falla principal, pero teniendo en cuenta que el FRP aumenta esta resistencia a tal punto de que la compresión si pudiera afectar el rompimiento de la mampostería en algunos casos, suceso que no se puede apreciar en muros simples pero que aquí se observa modificando la forma como colapsaría la estructura (mejor estabilidad). La ubicación del laminado es de vital importancia para contrarrestar la curvatura generada por estos tipos de cargas.

2.1.2 Adaptación de Mampostería Reparada con CFRP

El trabajo titulado “Adaptación de CFRP en Muros de Mampostería” realizado por Gergely, Vandergriff y Young (GERGELY et al., 1999) en la Universidad de Carolina del Norte (Estados Unidos), es uno de los primeros en introducir al investigador en el análisis del FRP como reparador de mampostería con fallas en su estructura original ocasionadas por sismos (juntas pre-falladas). Midiendo la influencia del cortante y la flexión en los sistemas Mampostería-FRP (reforzamiento y reparación) para entender la adaptación de este sistema a las construcciones de mampuestos.

2.1.2.1 Resumen

Los modelos consistían en muros simples (6 en total) de dimensiones reales en enlace soga (considerados estrechos o esbeltos), conformados por unidades de concreto (resistencia a la compresión de 10.3 MPa) y juntas de mortero tipo S (para datos similares en Colombia ver Anexo-A.). Estos muros fueron inicialmente

sometidos a cargas horizontales de pre-falla estáticas (un muro para cortante y uno para flexión) y cíclicas (2 muros para cortante y 2 para flexión).

La aplicación completa a lado y lado del muro de varias configuraciones de láminas unidireccionales de CFRP (FiberBond™) con adhesivo epoxi (tanto para cortante, como para flexión) y usando la técnica Lay-Up: dos capas de fibras a +/- 45° de la vertical del muro para cargas a cortante, dos verticales (0°/0°) y dos capas en dirección vertical y horizontal (0°/90°) para cargas a flexión. Con los modelos construidos los investigadores tomaron las precauciones para la medición de desplazamientos en el plano y fuera de este, control de los niveles de esfuerzo del FRP y de la mampostería por medio de dispositivos especiales, implementación cuidadosa de anclaje de los muros de cortante en su base y colocación de elementos estructurales arriba y abajo de los muros de flexión para permitir un desarrollo normal de la prueba (*Figura 6*).

Figura 6. Pruebas en muros con CFRP: de cortante por cargas laterales (izquierda) y flexión fuera del plano (derecha).



Fuente: Modificado de (GERGELY et al., 1999).

2.1.2.2 Resultados de Gergely et al. (GERGELY et al., 1999)

Los autores concluyeron que los muros con $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ tienen poco aumento de la resistencia a flexión y mucha a cortante (deformaciones similares para cualquier configuración), alcanzándose muy poco trabajo del FRP. Para las configuraciones $0^{\circ}/0^{\circ}$ y $0^{\circ}/90^{\circ}$ el aumento de resistencia y deformación es considerable más que todo a flexión, desperdiciándose de nuevo el uso de FRP, esto debido a la aplicación de un excelente adhesivo y de una extra capa, al parecer no necesaria. El laminado permitió un aumento de deformaciones, permitieron el incremento del agrietamiento en la parte pre-fallada y continuando el mismo tipo de falla según la carga soportada (a cortante siempre fallando por la interfaz de la base del muro (deslizamiento) y a flexión con agrietamiento en la mitad del muro)), pero siempre conservando la integridad de la estructura. El CFRP aumentó hasta un 1100% la carga resistente a cortante y en un 3400% a flexión (2-3 veces más en la parte a tensión que la de compresión).

2.1.2.3 Análisis para el Estudio a Flexión y Cortante

Los modelos experimentales realizados por los autores relacionados se ubican dentro de la correcta prueba de muros en tamaño real, por lo que sus resultados son muy provechosos para los investigadores y a pesar de su antigüedad se exponen por su importancia en este estudio. Muestran un correcto aumento de la resistencia y deformación en la mampostería pre-fallada con capas completas de láminas de CFRP a lado y lado de un muro, con un modelo regular de falla para cortante y flexión. La orientación de la fibra reluce como la principal conclusión de este trabajo, en donde el FRP con fibra a 45° es adecuada para el cortante porque los esfuerzos máximos se distribuyen de forma diagonal (a pesar de la falla a deslizamiento que se anuncia en este modelo); y con fibra vertical (0°) es

adecuada para la flexión fuera del plano en una sola dirección, porque esa flexión ocasiona la tracción adecuada en el FRP y respaldando la resistencia del muro.

Se resalta que no se asegura la falla diagonal bajo cargas de cortante, debido a la geometría del muro que requeriría uno menos esbelto para lograr esto, a pesar de ello se prueba la eficacia del FRP. Por su lado, la flexión presenta una falla común y la deslaminación se da por efectos de la curvatura del muro, concordando con las bases teóricas propuestas anteriormente.

2.1.3 Refuerzo de Mampostería de Tufa con CFRP

Faella, Martinelli, Nigro y Paciello (FAELLA et al., 2004) presentaron el trabajo denominado “Muros de Mampostería de Tufa Fortalecidos con un Nuevo Tipo de Láminas de CFRP: Ensayos Experimentales y Análisis” donde por medio de algunos modelos de mampostería con unidades de tufa (roca de ceniza volcánica, muy común en edificios de Italia) comprueban los beneficios del CFRP adherido externamente con mortero para resistir cargas horizontales de cortante. El uso de mortero para evitar tratamientos en las superficies irregulares de las unidades.

2.1.3.1 Resumen

Los modelos utilizados (6 especímenes con resistencia a la compresión de 1.30 MPa) constan de las unidades ya mencionadas (la tufa tienen resistencia a la compresión de 4.06 MPa), junto con mortero conformado por limo, puzolana y agua (resistencia a la compresión de 1.03 MPa), y refuerzo externo de láminas bidireccionales de FRP de carbón de baja densidad (resistencia a la tracción de 1600 MPa). Estos se construyeron según las especificaciones del Código Italiano

de Construcción contando con 2 muros sin refuerzo, 2 muros con refuerzo en un lado y 2 muros con ambos lados reforzados.

Para la aplicación de la prueba a cortante, se limpió primero la superficie de los muros, se colocó la primera capa de mortero (de mayor resistencia que el de pega), el cual es utilizado para nivelar las imperfecciones y adherir el laminado al muro, finalmente se colocó una lámina completa de laminado y luego otra capa de mortero para anclar el FRP correctamente a la mampostería (*Figura 7*). Para medir el comportamiento a cortante de la mampostería-mortero-FRP se realizaron ensayos de compresión diagonal con control de deformaciones transversales y longitudinales a la diagonal del muro (*Figura 7*), ya que se comprobó previamente por Faella et al. (FAELLA et al., 2004) que estos ensayos son más efectivos que los típicos de cargas laterales horizontales.

Figura 7. Colocación externa del refuerzo CFRP (izquierda) y modelo de la prueba a compresión diagonal (derecha).



Fuente: Modificado de (FAELLA et al., 2004).

2.1.3.2 Resultados de Faella et al. (FAELLA et al., 2004)

Los autores comprobaron la buena influencia en la resistencia a cortante de la mampostería por medio del uso de FRP y relacionaron sus resultados con un análisis teórico tomado del Código Italiano de Construcción, encontrando que sus resultados experimentales estaban muy por debajo de lo regido por esta norma, esto debido a la severidad de los ensayos y a la calidad de las unidades. A pesar de ello encontraron que la mejor opción de refuerzo FRP con unión mortero, es el laminado a lado y lado del muro, ya que brinda mejor estabilidad, alta adherencia, mayores deformaciones longitudinales y transversales, y mejor resistencia (aumento del 70% para estructuras con un lado de FRP y 130% para ambos lados). Con respecto a la falla, esta sigue siendo de tensión diagonal, tal como si no estuviera reforzada, pero se presenta con una mayor carga última y con colapso solo cuando se presente deslaminación, la cual no es muy severa debido a la buena unión con mortero.

2.1.3.3 Análisis para el Estudio a Cortante

La configuración del modelo de mampostería permite observar correctamente la falla principal a cortante, con un aumento de resistencia y deformaciones, concluyendo la eficacia del FRP para reforzar ante el cortante (compresión diagonal). Se comprueba además la ineficacia del refuerzo de laminado de un solo lado de los muros y que la adaptación en los dos lados posee mayores beneficios mecánicos; el FRP no es solicitado hasta su máxima deformación ya que como la teoría lo confirma y sus características de tracción no son tan útiles en casos de corte. También cabe resaltar que el fenómeno de deslaminación y peladura del FRP se debe a la adherencia lograda entre los sólidos, el compuesto y el mortero, logrando buenas características mecánicas (tales como aumentar la integridad de la estructura) pero con las desventajas de aumentar la invasión y el peso total de

la estructura. Los resultados con el mortero pueden ser tomados para analizar la conducta de la mampostería pero el epoxi aun exhibe mayores beneficios para el sistema en general.

2.1.4 Confinamiento de Mampostería con FRP

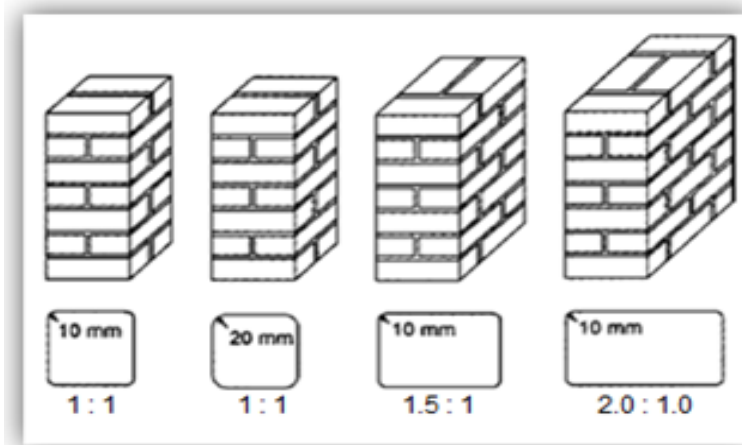
El modelo experimental desarrollado por Krevaikas y Triantafillou (KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU, 2005) propuesto en el trabajo “Mampostería Confinada con Polímeros Reforzados con Fibra” expone el comportamiento a compresión de varios tipos de muros de mampostería ante su confinamiento con FRP, es decir, su recubrimiento total del área superficial con telas de compuesto, midiendo la influencia en la resistencia ultima de varios parámetros importantes para la simulación y su relación con el comportamiento de los elementos de concreto.

2.1.4.1 Resumen

Dichos investigadores construyeron 42 especímenes a escala de muros dispuestos en 4 modelos de diferentes relaciones longitud/altura (*Figura 8*), conformados por ladrillos de arcilla (resistencia a la compresión de 23.5 MPa), mortero (cemento, limo, arena y agua) de 10 mm de espesor (resistencia a la compresión de 2.23 MPa), y refuerzo de varias capas (bandas de 100 mm de ancho máximo) de GFRP (resistencia a la tracción de 2000 MPa) o CFRP (resistencia a la tracción de 3500 MPa). Para la realización de las pruebas se realizó la respectiva construcción y curado de los muros, además de su nivelación del área por medio de rodillo y masilla de epoxi, para posteriormente efectuar la colocación de las capas usando el Lay-Up (una, dos o tres capas de CFRP y cinco de GFRP) con hasta dos partes de adhesivo epoxi. Las pruebas a cargas de compresión axial normal se realizaron 30 días después del colocado el refuerzo

para permitir la adherencia y el curado del mismo en la mampostería, todo para medir parámetros como el número de capas de refuerzo, la sección transversal de los muros, condiciones de contorno (esquinas redondeadas) y tipo de fibra del FRP.

Figura 8. Tipos de muros de los modelos experimentales.



Fuente: Modificado de (KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU, 2005).

2.1.4.2 Resultados Krevaikas y Triantafillou (KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU, 2005)

Se observó en estos modelos que los polímeros reforzados con fibra de confinamiento aumentan considerablemente las propiedades a compresión de la mampostería y que su comportamiento global y de falla es similar a la del concreto confinado (buena comparación con cálculos numéricos). Resaltándose una conducta similar en todos los ensayos, los beneficios del FRP y la bi-linealidad de la curva esfuerzo-deformación de todos los especímenes, con un aumento progresivo de la resistencia, disminución lenta por una falla dúctil y posterior colapso. El aplastamiento del muro se describió principalmente en la interfaz

unidades-mortero, seguida por agrietamiento vertical en las unidades y una expansión lateral que termina en el desprendimiento del FRP en las esquinas de los muros (zona más débil de anclaje).

Krevaikas y Triantafillou (KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU, 2005) analizaron cada uno de sus parámetros en estudio y concluyeron que en general con el uso de FRP se puede ganar mayores valores de deformación y esfuerzos pico. También que el número de capas de CFRP puede afectar de manera proporcional la resistencia (hasta un 160%) y deformación (hasta un 29%) de las estructuras de mampostería expuesta; que existe mayor ganancia de resistencia con el CFRP que con el GFRP (28% de diferencia) siempre y cuando se cuente con un apropiado anclaje (2.5 de capas con fibra de carbono equivalen aproximadamente a 6 con fibra de vidrio); que el GFRP tiene mayor capacidad de deformación; que a menor sección transversal y mayor radio en las esquinas el confinamiento de FRP es más efectivo; y que tanto las condiciones de borde de los muros como las características de las láminas interfieren en su comportamiento lineal, pero el ancho de los mismos no modifica los resultados experimentales del FRP-mampostería pero si su tipo de falla (no analizado en este trabajo).

2.1.4.3 Análisis para el Estudio a Compresión

Aunque la mampostería expuesta y el confinamiento no son muy comunes en las estructuras, los resultados de este trabajo son muy completos ya que se analiza detalladamente cada componente del sistema muro-FRP y se miden los beneficios de una u otra característica. Los autores (KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU, 2005) son muy claros en demostrar el beneficio del FRP en aumento de resistencia, ductilidad y retardando el colapso de la mampostería, resaltando el CFRP como el compuesto más resistente y el GFRP como el más deformable. El confinamiento es más efectivo que el recubrimiento a lado y lado de los muros, si un muro se

puede confinar con FRP se debería hacer, ya que la ganancia de resistencia es mayor en relación al gasto de material o dinero que se pueda efectuar.

La única diferencia que se puede encontrar en los modelos de Krevaikas y Triantafillou (KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU, 2005) es en la etapa de colapso de la estructura, la integridad se mantiene casi en todos los casos (en contrario de la teoría, demasiada compresión genera alta deslaminación) y solo en las esquinas del muro se presenta desprendimiento del laminado, no por la combinación del aplastamiento y agrietamiento de las unidades, sino por la forma puntiaguda de las esquinas y el tipo de falla mencionado.

2.1.5 Mampostería Reforzada Externamente con Telas de CFRP

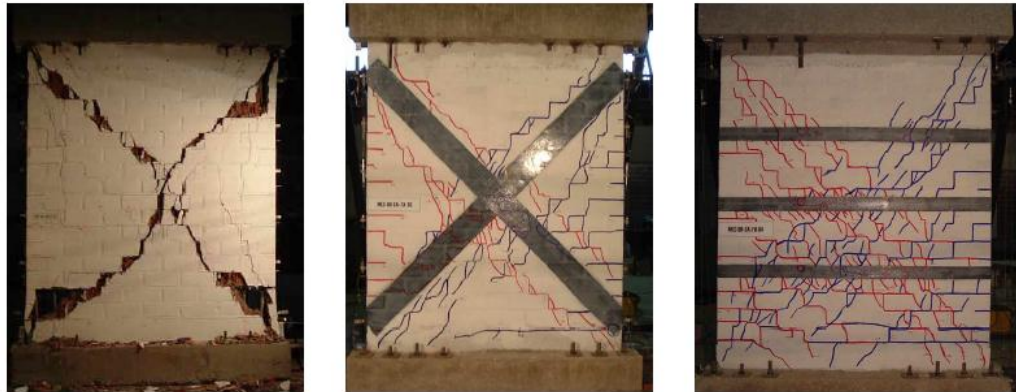
El siguiente modelo experimental probado en Chile y presentado en Estados Unidos con el trabajo de nombre “Respuesta Experimental de los Muros de Mampostería Reforzados Externamente con Telas de Fibras de Carbón” por Santa Maria, Alcaino y Luders (SANTA MARIA et al., 2006) muestra el comportamiento de la mampostería reforzadas únicamente con bandas de CFRP y sometida a cargas laterales que generan esfuerzos cortantes, con el fin de analizar el tipo de falla y los beneficios de este sistema.

2.1.5.1 Resumen

Santa Maria et al. (SANTA MARIA et al., 2006) realizaron pruebas de cargas laterales cíclicas (y con ligera compresión axial) en 2 muros sin refuerzo, 2 reforzados con bandas de telas de fibras en forma horizontal y 2 más con telas por las diagonales principales del espécimen (siempre a lado y lado del muro) (*Figura 9*). Los modelos desarrollados (resistencia al corte de 0.85 MPa) tenían

dimensiones aproximadamente reales, eran poco esbeltos, en enlace soga y estaban anclados a dos vigas transmisoras de carga en la parte inferior y superior del muro (montaje común en las pruebas a cargas horizontales). Las unidades solidas eran de arcilla perforados (resistencia a la compresión de 11 MPa), el mortero de pega era simple mezcla de arena, cemento y agua (resistencia a la compresión de 2.5 MPa), y el refuerzo era FRP común con fibra de carbón (resistencia a la tensión de 3500 MPa) adherido en sitio con la técnica Lay-Up (lijado previo de la superficie del ladrillo donde se van a ubicar las bandas para brindarle la rugosidad necesaria para la aplicación del adhesivo epoxi utilizado). El procedimiento de construcción tuvo la particularidad de agregar fibra en las juntas verticales de mortero para aumentar la resistencia a cortante y realizar anclajes con barras de acero en las esquinas del muro para asegurar su unión con los elementos de concreto y poder realizar la prueba correctamente (*Figura 9*).

Figura 9. Modelos fallados, las líneas azules y rojas se diferencian por la diagonal de propagación.



Fuente: (SANTA MARIA et al., 2006).

2.1.5.2 Resultados de Santa María et al. (SANTA MARÍA et al., 2006)

Los muros de mampostería sin refuerzo experimentaron una falla frágil con fisura de tensión diagonal y una pérdida del 25% de la resistencia; aquellos con refuerzo diagonal también tuvieron falla frágil con varias fisuras diagonales, resaltando que los esfuerzos mayores se presentan en la parte inferior del muro por lo que los ladrillos ahí experimentaron las fisuras iniciales y la deslaminación se exhibe hasta en un 50% (acciones de flexo-cortante o deslizamiento). Por su parte, aquellos con FRP horizontal fallaron al mismo tiempo que se presenta deslaminación, disminuyendo su resistencia de forma progresiva (falla frágil pero menos brusca) así como aumentando el número de grietas y la desprendimiento del FRP (hasta un 80%). En todos los casos de refuerzo el aumento de resistencia y deformación es evidente (aumenta carga pico hasta 30%), para la configuración diagonal existe un incremento del 63-84% y para horizontal del 57-61%.

2.1.5.3 Análisis para el Estudio a Cortante

Este modelo muestra una solución más sencilla y económica en el uso de FRP para aumentar la resistencia a cortante, además del control de los esfuerzos para lograr una falla a tensión diagonal. Con respecto a lo primero se puede observar los buenos beneficios sin ser deslumbrantes para el ingeniero estructural, ya que no hay el aumento de capacidad esperado, pero la configuración del refuerzo diagonal (fibras en dirección 45°) adquiere protagonismo en la resistencia a cortante, tal como lo demostraron Gergely et al. (GERGELY et al., 1999). También se muestra que por más precauciones que se intenten tomar en muros casi esbeltos la flexión o el deslizamiento como falla siempre están presentes por lo que se debe establecer la importancia de construir muros de relaciones longitud/altura grandes (mayores a 2.0) y con buen anclaje a su cimentación.

La integridad de las estructuras de mampostería hasta ahora reluce como uno de los beneficios que más es necesario en el uso de FRP, por lo que el planteamiento de un refuerzo diagonal que asegure esto, deslaminación tardía y además un aumento de resistencia y ductilidad aumentan los beneficios de análisis de los modelos.

2.1.6 Capacidad Cortante de la Mampostería Reforzada con Láminas GFRP

Los modelos a cortante aumentan su importancia a medida que pasa el tiempo para consolidar el comportamiento de la mampostería reforzada con FRP bajo cargas laterales. Wang, Chai, Huang y Zhang (WANG et al., 2006) realizan otra variación de esta simulación experimental en el trabajo “Capacidad a Cortante Sísmico de Muros de Mampostería Reforzada con GFRP”.

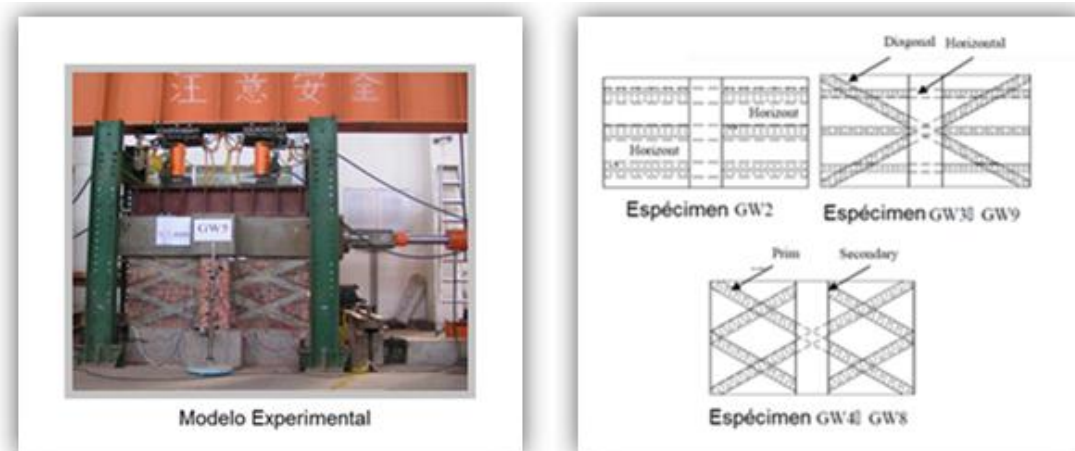
2.1.6.1 Resumen

Se probaron modelos de mampostería de dos muros conjuntos con un pilar de mampuesto en medio (*Figura 10*) construidos con ladrillos macizos de arcilla (resistencia a la compresión de 10.15 MPa) y mortero simple (resistencia a la compresión de 2.5 MPa), además reforzados con láminas muy delgadas de GFRP (resistencia a la compresión de 1507 MPa y espesor de 0.169 mm). La configuración de los modelos se caracterizaba por su alta rigidez (gran sección) y por la compañía de elementos de para asegurar las pruebas prácticas tal como lo hicieron Santa Maria et al. (SANTA MARIA et al., 2006).

En total fueron 9 modelos en tamaño real de mampostería, 1 de ellos sin refuerzo, 1 con refuerzo horizontal, 5 con láminas de diferentes anchos en las diagonales principales y 2 con superposición de láminas horizontales y diagonales (*Figura*

10). Para la aplicación de las láminas de GFRP se resalta que se limpió la superficie de los muros de restos de mortero, polvo y partículas, tal como es necesario, aplicándosele luego una capa de resina epoxi y humo de sílice para rellenar espacios y realizar la función de pegante, para posteriormente adherir las láminas de GFRP con un rodillo que tiene resina en él.

Figura 10. Configuración del modelo (izquierda) y del refuerzo (derecha).



Fuente: Modificado de (WANG et al., 2006).

2.1.6.2 Resultados de Wang et al. (WANG et al., 2006)

A pesar del montaje poco común y de la pre-compresión, la falla general fue por deslizamiento de la base de cada muro (aunque también se presentó deslaminación y compresión lateral en algunos casos), la resistencia en el plano de corte se aumentó un poco (del 25% en la carga máxima) y los autores encontraron buena relación de sus modelos con cálculos numéricos realizados previamente. El comportamiento se describe como no lineal debido a las disposiciones de las simulaciones y el FRP se concluye como un material idóneo para el reforzamiento por su fácil aplicación y sus grandes beneficios mecánicos.

El refuerzo diagonal es más efectivo que el horizontal en todo sentido cuando se trate de esfuerzos de corte, y el de laminado superpuesto aunque es el más efectivo, desperdicia un poco el material de refuerzo ya que no es mucho lo que aumenta la carga con respecto al gasto del material que implica.

2.1.6.1 Análisis para el Estudio a Cortante

El modelo experimental realizado por los investigadores en cuestión aunque poco común y fuera del prototipo común de simulaciones, muestra observaciones importantes y recalca de nuevo el problema de la mampostería a cortante y su posible falla por separación de la interfaz unidades-mortero en su base, una falla perjudicial para estas estructuras. Otra vez se contempla el aumento de resistencia y deformaciones del FRP, además de sus beneficios para mantener la integridad de la estructura y menor deslaminación gracias al uso de un buen adhesivo (y una buena preparación de la superficie a laminar).

Gergely et al. (GERGELY et tal., 1999), Santa Maria et al (SANTA MARIA et al., 2006) y ahora dichos investigadores (WANG et al., 2006) comprueban que las bandas de FRP en dirección a las diagonales principales aumentan considerablemente la resistencia a cortante (cargas laterales) y por lo tanto son unas de las mejores opciones para el reforzamiento de la mampostería con esfuerzos de este tipo (el laminado horizontal actúa bien también ya que es bueno para resistir algunos efectos de flexión del modelo).

2.1.7 Resistencia Sísmica de la Mampostería Reforzada con FRP

Los investigadores Elgawady, Lestuzzi y Badoux (ELGAWADY et al., 2006) sobresalen por la realización de modelos experimentales de mampostería

reforzada con FRP bajo movimientos sísmicos aplicados por un montaje elaborado de mesa vibratoria, todo reseñado en el trabajo denominado “Reforzamiento Sísmico de Mampostería Simple usando FRP”.

2.1.7.1 Resumen

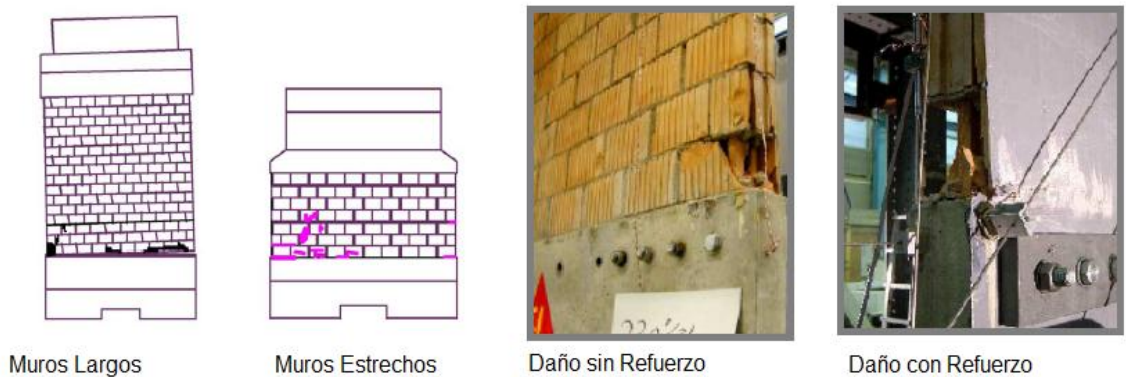
Elgawady et al. (ELGAWADY et al., 2006) propusieron la evaluación de los sistemas muros-FRP sobre modelos de tamaño real (muros esbeltos y cortos) que experimenten movimientos vibratorios sintéticos similares a los sísmicos. Midiendo la conducta aproximada a flexión y cortante en muros sin reforzar y con diferentes configuraciones de refuerzo diagonal o completo: refuerzo por las diagonales principales de láminas de CFRP (Sika CarboDur), con tela completa de GFRP (SikaWrap-300G y MeC Grid G4000) y con tela completa de AFRP (FRP de fibra de aramida, SikaWrap-400A) para todo tipo de muros, además de bandas diagonales de GFRP solo para muros esbeltos (la resistencia a tensión de todos los refuerzos varía entre 2400 MPa y 3450 MPa).

Los muros de mampostería construidos en enlace soga con ladrillos perforados de arcilla unidos con dos tipos de mortero, débil y fuerte, reforzado en un solo lado con el FRP mencionado, el cual estaba asegurado en sus extremos con tornillos y láminas de metal (sin medir su incidencia). La mampostería simple fue ensayada dinámicamente y previamente fallada antes de someter los muros al recubrimiento de FRP y posterior prueba sísmica. Los resultados experimentales fueron comprobados con un análisis teórico por Elgawady et al. (ELGAWADY et al., 2006), donde la resistencia a cortante es dada por el FRP y la mampostería, pero la resistencia a flexión fuera del plano es dada “únicamente” por el FRP.

2.1.7.2 Resultados de Elgawady et al. (ELGAWADY et al., 2006)

Se encontró generalmente que los muros pueden deformarse y resistir más los efecto flexo-cortantes con el FRP, además mantienen su rigidez constante, se comportan de manera lineal hasta su ruptura (después de la deslaminación se presenta comportamiento no lineal con pérdida de resistencia), y pueden fallar por flexión, deslizamiento en la base con agrietamiento diagonal para los muros esbeltos y agrietamiento del mortero y unidades para muros cortos cerca de la base (*Figura 11*). Entre más resistente sean las uniones mortero-unidades y unidades-FRP, mayor serán los beneficios en la estructura.

Figura 11. Falla en la base de los modelos experimentales.



Fuente: Modificado de (ELGAWADY et al., 2006).

Elgawady et al. (ELGAWADY et al., 2006) encontraron un aumento de resistencia en los muros con refuerzo completo de hasta 2.9 veces y con refuerzo diagonal de hasta 1.5 veces con respecto con la mampostería simple, los primeros no sufrieron daños visibles pero aquellos con refuerzo diagonal cruzado no aguantaron y fallaron a cortante y flexión, debido principalmente a los efectos negativos de este último comportamiento. Los muros sometidos con pruebas laterales de sismicidad

poseen mejoras en su comportamiento relacionadas directamente con el aumento de resistencia y configuración del refuerzo, pero poca relación con el tipo de FRP. Finalmente se concluyó que el FRP no alcanza sus resistencia máxima a tensión (la resistencia a tensión del muro es mayor que la que se transmite al FRP), que se desperdicia su capacidad de deformación (solo se alcanza al 50%) y que no se sufre deslaminación cuando se cubre toda la superficie del muro, debido a los altos beneficios de resistencia y el buen adhesivo utilizado en estas configuraciones.

2.1.7.3 Análisis para el Estudio a Cortante-Flexión

Los modelos experimentales que someten a la mampostería a efectos sísmicos sintéticos directos empiezan a convertirse en herramientas más precisas para evaluar el comportamiento de estas estructuras con refuerzo de FRP, sin embargo, en este caso no se puede establecer la resistencia última lateral de los muros debido a limitaciones aun de los ensayos.

El aumento de resistencia y ductilidad de la mampostería es comprobado y se aprecia que el refuerzo completo de área de los muros es muy efectivo para los efectos dinámicos de flexo-cortante de un sismo, siempre y cuando la dirección de la fibra sea horizontal o diagonal, ya que tal como se conoce de la teoría estas dos configuraciones conducen a un buen comportamiento mecánico bajo estas cargas. Cabe resaltar que se sigue demostrando la importancia de la cimentación de la mampostería y de la unión del laminado a las unidades en la parte inferior del muro, ya que en este lugar es donde se presenta los grandes esfuerzos, mayor agrietamiento y deslaminación inicial del FRP.

2.2 Simulaciones Numéricas

La investigación realizada sobre el comportamiento de la mampostería reforzada con FRP nos conduce al hallazgo de pocos modelos numéricos planteados y disponibles para el investigador, debido a lo innovador que puede ser este tema. Algunos de los más importantes y su comportamiento se plantean en este capítulo, inicialmente realizándose una breve explicación de cada simulación numérica y sus complementos (experimentos o análisis teórico) en término de tipos de modelo, materiales, generalidades y cargas a analizar, luego tabulando, resumiendo y contrastando los resultados obtenidos con los modelos experimentales base o la teoría planteada, y terminando en el análisis realizado por el autor de este estudio.

2.2.1 Modelación Numérica de Mampostería Reforzada con Compuestos

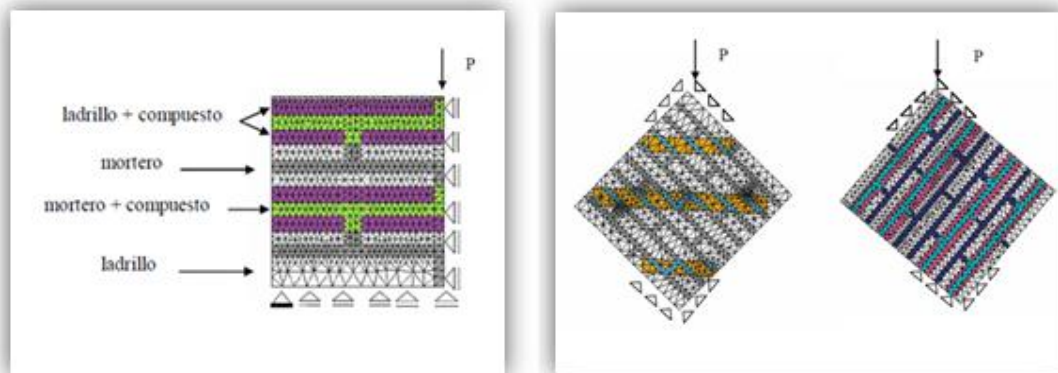
El trabajo numérico-experimental “Modelación Numérica de Mampostería Reforzada con Materiales Compuestos” tratado por Rougier y Luccioni (ROUGIER y LUCCIONI, 2006) es uno de los más completos recopilados para este estudio en el análisis de la mampostería reforzada con varias configuraciones de láminas de FRP bajo la acción particular de cargas de compresión y cortante.

2.2.1 Resumen

Rougier y Luccioni (ROUGIER y LUCCIONI, 2006) realizaron un análisis de las variables necesarias para desarrollar micromodelos detallados de elementos finitos (simétricos) de mampostería no reforzada y reforzada con CFRP, validándolos correctamente con modelos experimentales de compresión directa (carga axial) y compresión diagonal (carga de cortante) previamente realizados.

Para la realización de los modelos numéricos se utilizaron mallas de elementos finitos triangulares, se consideró al muro de mampostería como ortótropo y elasto-plástico (a pesar de la aclaración de anisotropía presente en este mismo trabajo), se realizaron consideraciones analíticas de anisotropía e isotropía para los materiales, y se realizó un análisis local del muro según el comportamiento de cada elemento, así como de las uniones FRP-Unidades y FRP-Mortero. Para cargas a compresión se contó con un muro sin refuerzo, otro con láminas en bandas horizontales y otro con recubrimiento total de la superficie, y para cargas a cortante se contó de igual forma con un muro sin refuerzo, además de un muro con refuerzo horizontal, uno con bandas perpendiculares a la diagonal del muro (*Figura 12*) y otro completo.

Figura 12. Modelo discretizado a compresión (izquierda) y configuraciones a compresión diagonal de la mampostería (derecha).



Fuente: Modificado de (ROUGIER y LUCCIONI, 2006).

Para las simulaciones desarrolladas, se utilizaron dos tipos de unidades macizas de arcilla (resistencia a la compresión de 8.28 y 10.6 MPa) y 3 tipos de pega de mortero simple (resistencia a la compresión de 6.73, 7.72 y 4 MPa). Estos materiales son bien conocidos como ortótropos y de comportamiento plástico, pero

para simplificaciones de los modelos, se suponen isótropos. En cuanto al refuerzo, el CFRP fue la mejor opción detallada por Rougier y Luccioni (ROUGIER y LUCCIONI, 2006) para su trabajo, debido a que por sus características mecánicas (tensión última longitudinal de 960 MPa) puede ser utilizado para reforzar muros de mampostería satisfactoriamente. Este presenta un comportamiento ortótropo y elasto-plástico cuando se somete a cargas en el plano. En estos modelos, se utilizó este tipo de FRP en forma de laminado unidireccional (lámina doble) y espesor total de 1 mm (bandas de 70 cm de ancho), el cual es adherido a los muros con adhesivo epoxi según la técnica Lay-Up.

2.2.1.2 Resultados de Rougier y Luccioni (ROUGIER y LUCCIONI, 2006)

Los resultados de los autores de los modelos se dividen en dos reuniendo los mejores comportamientos de su análisis matemático-teórico y experimental, según las comparaciones de las simulaciones a compresión y cortante. Inicialmente se presentan los resultados a compresión axial, el modelo sin refuerzo indicó fisuras verticales frontales en las unidades, el mortero y su interfaz se separa como resultado del aplastamiento sufrido. Luego con refuerzo de láminas horizontales (fibras en dirección perpendicular a la sollicitación) se alcanzó un poco de mayor resistencia a la compresión (6%), presentándose grandes esfuerzos y grietas solo en las laterales del muro (aumento de deformación del 4%); por su lado, con refuerzo total en ambos lados de la mampostería, se muestra otro pequeño aumento en la carga resistente (11%), un gran aumento en las deformaciones (117%) y el mismo tipo de falla con refuerzo. Concluyéndose entonces que el laminado es capaz de modificar la falla de la mampostería bajo cargas de compresión, aumentando en pequeña cantidad su rigidez y resistencia, y en gran cantidad su capacidad de deformación máxima y ductilidad.

Bajo cargas de compresión diagonal (midiendo efectos cortantes) los investigadores observaron que el muro sin reforzar presenta los esfuerzos máximos en las juntas horizontales y por lo tanto una falla frágil y repentina por separación en sus interfaz (formando una gran fisura en la diagonal según los ensayos experimentales). Los muros sometidos a compresión diagonal (esfuerzos cortantes) presentan mayor resistencia (190%), deformación (270%) y rigidez cuando son reforzados totalmente, aunque no modifican el tipo de falla en ninguno de los casos. Por otro lado, la mampostería con refuerzo en bandas aumentan un pequeña cantidad su resistencia (75% y 5%), resaltando que aquellos con laminado diagonal (perpendiculares a la dirección de la carga ensayada) poseen un mayor capacidad de deformación máxima (115%), la cual según comparaciones experimentales puede ser aumentada, cuando el adhesivo epoxi es de mayor resistencia y el posible contacto con la sección transversal (anclaje) es de mayor longitud o sofisticación.

2.2.1.3 Análisis para el Estudio a Compresión y Cortante

Los modelos numéricos de Rougier y Luccioni (ROUGIER y LUCCIONI, 2006) resaltan por su completo desarrollo de características mecánicas y geométricas que permiten observar un comportamiento muy aproximado de los sistemas muro-FRP, además de un considerable aumento de resistencia y capacidad de deformación. En general se puede apreciar la modificación de la falla en compresión debido al aumento de resistencia en la superficie del muro y falta de refuerzo en sus laterales (agrietamiento aquí), además de mostrarse los beneficios del recubrimiento total con laminado y que según la dirección de la fibra para los ensayos de compresión diagonal. Cuando los muros se agrietan por la interfaz, mantienen su forma debido a la fibra y colapsan cuando las unidades se quiebran. Cabe resaltar que estos modelos numéricos solo pueden mostrar la distribución de

esfuerzos y el agrietamiento de manera distribuida, mientras los experimentales muestran el verdadero agrietamiento local en el volumen del muro (fisuras más pequeñas).

2.2.2 Falla a Compresión de Modelos de Mampostería Reforzada con FRP

“Carga de Falla de los Muros de Mampostería Fortalecidos con FRP: Resultados Experimentales y Modelos Numéricos” es el título del trabajo realizado por Milani, Rotunno, Sacco y Tralli (MILANI et al., 2006), que plasma una comparación entre cálculos analíticos, modelos numéricos homogenizados y experimentales del comportamiento de ciertas configuraciones de mampostería cargada axialmente.

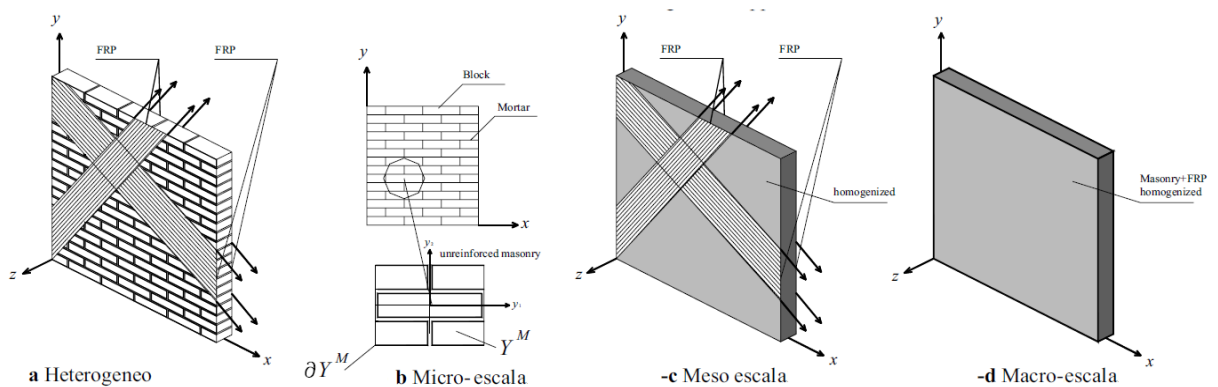
2.2.2.1 Resumen

La homogenización de un modelo numérico es el proceso matemático y analítico de transformación de estructuras heterogéneas en macromodelos más simples de solucionar por la técnica de elementos finitos (solo un ente continuo con las características de un muro y su refuerzo de FRP), pasando en el proceso por la etapa de micro-escala (homogenizar ladrillo y mortero) y meso-escala respectiva (homogenizar muro y refuerzo) para permitir el entendimiento del comportamiento global de una estructura (*Figura 13*).

Los muros (resistencia a la compresión de 6.76 MPa) propios de las simulaciones experimentales-numéricas tratadas estaban compuestos por unidades de arcilla (resistencia a la compresión de 15.6 MPa), mortero de limo-cemento con 30 mm de espesor (resistencia a la compresión 2.13 MPa) y refuerzo de CFRP en forma de bandas de 12.5 mm de ancho (resistencia a la tracción de 3430 MPa). Se probaron en total 5 tipos de modelos tanto experimental (3 especímenes por tipo)

como numéricos, 3 de ellos fueron muros completos (uno sin refuerzo, uno con una banda horizontal y otra con una banda diagonal) y 2 con un espacio rectangular central (uno sin reforzar y otro con refuerzo diagonal superior), utilizando el FRP descrito mediante bandas ubicadas donde se preveía la falla principal de la estructura.

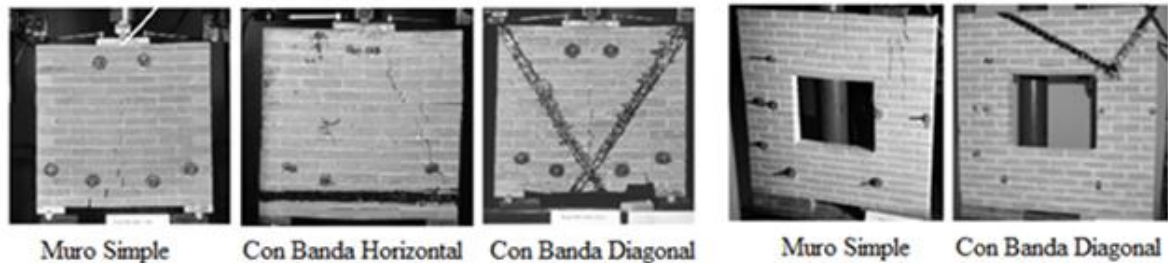
Figura 13. Etapas de la homogenización de la mampostería con FRP.



Fuente: (MILANI et al., 2006).

Los modelos numéricos de cada tipo de muro se realizaron en 2 dimensiones según las consideraciones geométricas de la homogenización planteada y solucionado mediante la técnica de elementos finitos, el mesh de los modelos se hizo distribuido según la zona a analizar, entre más cercano del refuerzo mayor división y realización de un análisis más detallado. Los resultados de cada análisis fueron comprobados como se anunció (*Figura 14*) y por ecuaciones numéricas propuestas por los mismos autores para validar teóricamente sus resultados teniendo en cuenta la ubicación de la carga a compresión, además de la teoría de Mohr-Coulumb para el análisis de ladrillos y juntas, y el comportamiento plástico-rígido que experimentan las láminas de FRP.

Figura 14. Configuraciones de los modelos tratados: tipo completo o con espacio central.



Fuente: Modificado de (MILANI et al., 2006).

2.2.2.2 Resultados de Milani et al. (MILANI et al., 2006)

Con la realización de este trabajo se comprobó las buenas concordancias existentes entre la capacidad de carga última a compresión de la mampostería reforzada con FRP tanto experimental como numéricamente, registrando curvas desplazamiento-fuerza inicialmente lineal, fallas de aplastamiento y posible deslaminación (la cual solo se aprecia experimentalmente, ya que numéricamente no es posible por la suposición macro realizada). El agrietamiento vertical y el comportamiento dúctil predominaron en el modo de falla, resaltando un aumento general de la resistencia en un 150%.

2.2.2.3 Análisis para el Estudio a Compresión

Las simulaciones relacionados por Milani et al. (MILANI et al., 2006) muestran un detallado análisis numérico por elementos finitos de gran interés para el estudio de los sistemas mampostería-FRP, funcionando como una excelente guía de modelación matemática pero con falta de resultados mecánicos. Se desarrolló un buen modelo por elementos finitos, análisis teórico y experimental que les permite

a los investigadores de la actualidad ganar confianza en las diferentes configuraciones de laminado de CFRP.

El modo de falla no cabe a discusión, debido a que el aplastamiento sigue rigiendo la compresión de los mampuestos, resaltándose la dependencia de la geometría de la estructura en estos casos, ya que tal como lo anuncia la teoría la distribución de los máximos esfuerzos afectan el lugar del agrietamiento. La resistencia a la compresión entonces depende de las propiedades de las uniones, resistencia de los materiales, espesor del mortero y geometría de la estructura.

2.2.3 Respuesta a Flexión de la Mampostería Reforzada con Compuestos

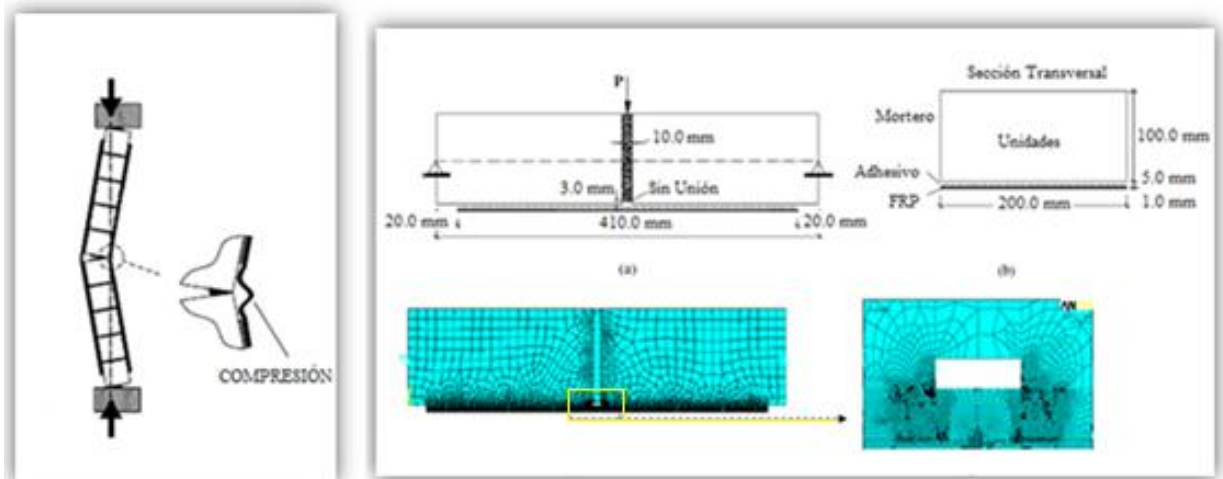
En el siguiente trabajo, de título “Efectos Geométricos No Lineales en la Respuesta a Flexión de los Muros de Mampostería Fortalecidos con Materiales Compuestos”, los autores Hamed y Rabinovitch (HAMED y RABINOVITCH, 2007) realizaron un análisis teórico del comportamiento del laminado de refuerzo de mampostería sometido a flexión, probando sus resultados con el desarrollo de un modelo numérico simple.

2.2.3.1 Resumen

Hamed y Rabinovitch (HAMED y RABINOVITCH, 2007) realizaron una investigación analítica y una micro-simulación numérica no lineal detallada para comprobar los efectos de este refuerzo en la mampostería con cargas que le generan flexión. Analizando la compresión y tensión de las láminas de FRP por medio de un modelo sencillo conformado por dos ladrillos, mortero de pega (resistencia a la compresión de 0.42 MPa) para unirlos por su sección transversal y láminas de FRP para resistir la flexión (*Figura 15*).

Para la realización de los análisis y de los modelos numéricos se consideró el aporte de rigidez y resistencia de todos los materiales, excepto del adhesivo, el cual no se tuvo en cuenta debido a su poca contribución a la resistencia a flexión de la mampostería. Por su lado, se resalta la existencia de tres tipos de uniones a definir dentro de la simulación realizada: unidades-adhesivo, mortero-adhesivo y adhesivo-FRP; además se debe tener en cuenta que la no linealidad presente en los muros se asume debido a la interfaz mortero-unidades y al fenómeno de deslaminación. El modelo fue realizado por los autores en el software Ansys®, simulando en dos dimensiones los elementos en áreas de 8 nodos elástico-lineales y las asociaciones descritas por medio de superficies “Contact”, estructuras creadas para generar comportamiento específicos entre materiales.

Figura 15. Comportamiento del laminado FRP a flexión fuera del plano (izquierda) y modelo numérico con refuerzo a tensión (derecha).



Fuente: Modificado de (HAMED y RABINOVITCH, 2007).

2.2.3.2 Resultados de Hamed y Rabinovitch (HAMED y RABINOVITCH, 2007)

El modelo numérico por elementos finitos produce un 25% más de resistencia que el modelo analítico desarrollado por los autores, buenas comparaciones entre los esfuerzos de la zona mortero-adhesivo, fuerza axial del FRP y esfuerzos en toda la zona de unión del FRP. En los modelos reforzados con FRP en un solo lado a tensión, el comportamiento es el esperado de aumento de resistencia y falla común en la parte a tracción. Mientras que con refuerzo en ambas caras del montaje (los esfuerzos en ambas caras del FRP es igual) se puede observar que la unión mortero-FRP tiende a fallar y se desprende en algunos casos debido a su inhabilidad de transmitir esfuerzos cortantes, además las zonas donde se presenta deslaminación es en la parte de unión con el mortero con un efecto total de 3 veces el espesor de la capa de adhesivo, aunque también puede existir desprendimiento por imperfectos en el adherido, la acción de precargas o el arrugamiento por compresión del laminado.

En general, los autores encontraron un aumento de la carga máxima soportada (1.2 veces más), de la estabilidad de la estructura y de las deformaciones (1.65 veces más). Por su lado se observó que el comportamiento no lineal además de ser ocasionado por la interfaz mortero-unidades y al fenómeno de deslaminación del FRP, se debe al comportamiento de arco de la mampostería a flexión fuera del plano y el arrugamiento del FRP en la zona a compresión (caso de doble refuerzo), descartando que la esbeltez de la mampostería afecte este comportamiento singular (solo afecta en pequeña cantidad la estabilidad).

2.2.3.2 Análisis para el Estudio a Flexión

Hamed y Rabinovitch (HAMED y RABINOVITCH, 2007) demuestran con sus resultados analíticos y numéricos las bondades del FRP en el refuerzo de las

entidades conformadas por mampuestos, analizando también de una forma completa la influencia de las uniones de los materiales, pero a base de un modelo muy simple que no entrega conclusiones muy concretas sobre la conducta global de los sistemas muro-FRP.

Los muros de mampostería experimentan bajo flexión una acción de arco que puede llevar al colapso por agrietamiento o aplastamiento en su superficie, sin embargo, en la mampostería con refuerzo de FRP se generan fuerzas de tracción que reducen las fisuras y producen un momento excéntrico par que contrarresta el momento flector externo, lo que permite un aumento de la estabilidad estructural. En este modelo se puede observar esto como la principal conclusión para el estudio en cuestión, sin punto de comparación de la falla global de un muro real, pero con resultados numéricos de aumento de resistencia y deformación proporcionales, ya que si para dos ladrillos se aumentó un 20% en su carga máxima, para 200 ladrillos, por ejemplo, que conformen una estructura de mampuestos el porcentaje será mayor y de gran beneficio.

2.2.4 Homogeneización de Modelos de Mampostería Reforzada con FRP

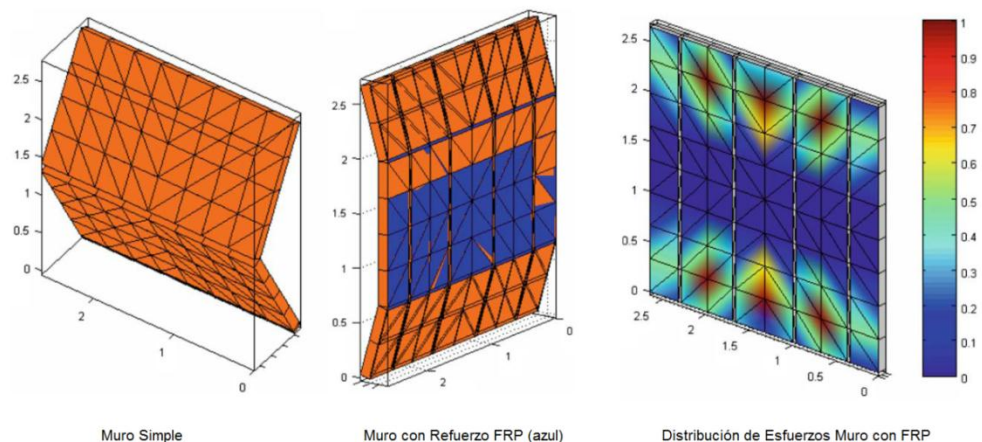
El modelamiento de la mampostería con FRP toma más fuerza en el ámbito científico con el uso de la técnica de homogenización, Milani (MILANI, 2009) ahora individualmente presenta una simulación numérica de este tipo en el trabajo “Análisis Limite Homogenizado de los Muros de Mampostería reforzados con FRP y Cargado Fuera del Plano”, teniendo en cuenta el comportamiento bajo flexión fuera del plano (cilíndrica) y flexión conjunta en dos direcciones.

2.2.4.1 Resumen

Siguiendo un procedimiento de homogenización (MILANI et al., 2006) para la creación de macromodelos lineales más elaborados en dos dimensiones, Milani (MILANI, 2009) compara su trabajo con simulaciones experimentales (lineales-plásticas) realizadas por autores alternos, los modelos a flexión cilíndrica (*Figura 16*) de Mosallam (2007) y flexión conjunta (*Figura 17*) de Chong, Southcombe y May (1994), trabajos no tratados en este estudio.

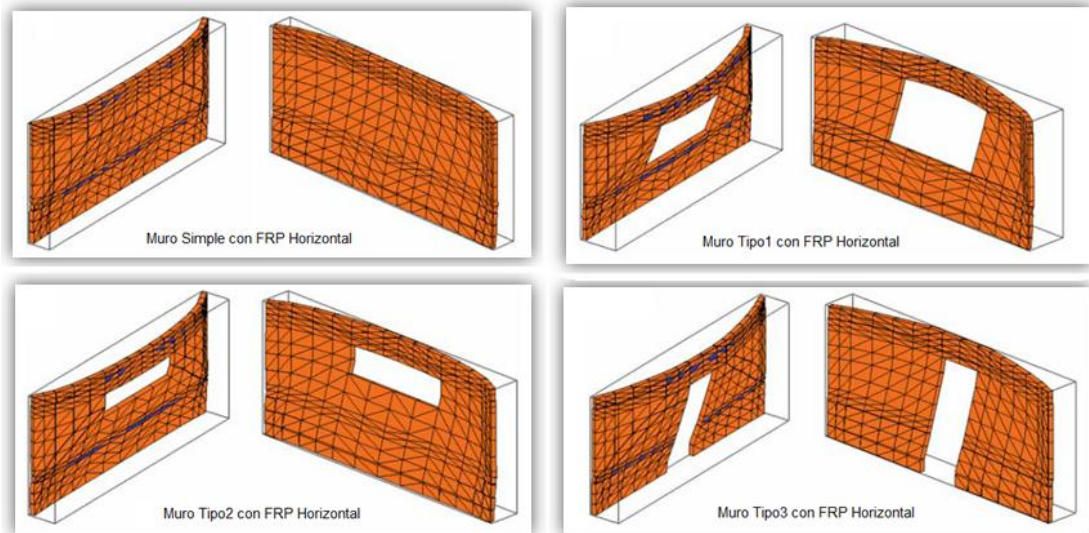
Para los modelos a flexión cilíndrica (muros con resistencia a la compresión de 25 MPa) se cuenta con unidades rojas de arcilla (resistencia a la compresión de 16 MPa) y refuerzo horizontal de tres tipos: dos láminas unidireccionales CFRP-epoxi ($0^{\circ}-0^{\circ}$), dos láminas horizontales y verticales ($0^{\circ}-90^{\circ}$) y una de tres capas unidireccionales de GFRP-epoxi (0°_3). Por su lado, los modelos a flexión en dos direcciones (con y sin aberturas) cuentan con ladrillos de material no especificado, mortero simple de 10 mm de espesor (resistencia a la compresión de 8 MPa) y láminas de FRP (tipo de fibra no mencionada) de 100 mm de ancho de banda en dos ubicaciones, arriba en el muro y a 1/3 aproximado de la altura del mismo.

Figura 16. Modelo numérico basado en las pruebas de MOSALLAM (2007).



Fuente: Modificado de (MILANI, 2009).

Figura 17. Modelos basados en las pruebas de CHONG et al. (1997).



Fuente: (MILANI, 2009).

Los modelos desarrollados deben tener en cuenta el comportamiento anisótropo de la mampostería, compresión limitada y frágil deslaminación del FRP, además de las fallas por agrietamiento y aplastamiento producidas por cargas fuera del plano, suposición de infinita resistencia de los ladrillos y la cohesión-fricción presente en la interfaz mortero-unidades (aplicación de la teoría de Mohr-Coulumb). Mientras que para la solución de estos modelos por medio de la técnica de elementos finitos (división triangular), se requiere propiedades físicas, condiciones de cargas, mecanismos de falla, distribución de esfuerzos, interacción muro-FRP (tangencial) y comportamiento del FRP (disipación de energía).

2.2.4.2 Resultados de Milani (MILANI, 2009)

Según el autor mencionado, los modelos homogéneos propuestos son capaces de detectar cargas máximas tales como los experimentales, detectando aumento en

la resistencia con el laminado de FRP. La resistencia a flexión máxima cilíndrica se alcanza cuando se forman grietas en la mitad del muro, pero debido al FRP, las grietas se forman en dos partes del mismo (no centrales, pero más o menos simétricas al centro del muro), generando deslaminación en esas dos partes y colapso posterior, en general hubo aumento de resistencia del 1250%. Para el caso de la flexión en dos direcciones se generaron cambios en los mecanismos de falla y aumento de la resistencia cuando se aumentaba la resistencia del adhesivo (unión FRP-muro). La falla del vínculo FRP-MW se presenta cuando hay deslaminación en las esquinas de las láminas, solo analizándose y observándose que el FRP actúa como un amarre en los muros generando gran presión contra las cargas de flexión y sufriendo grandes esfuerzos en los extremos de sus bandas.

2.2.4.3 Análisis para el Estudio a Flexión

Uno de los mejores avances en la modelación numérica de la mampostería reforzada con fibra lo realiza Milani (MILANI, 2009) en este trabajo, resaltando el buen análisis en términos de comportamiento mecánico y calibración con las simulaciones experimentales. La acción del FRP en la mampostería se puede observar con mejor detenimiento y analizando cual son los factores más influyentes en la eficacia de este material como refuerzo, el material adhesivo de calidad y la ubicación correcta de las láminas (en donde se esperan serán los esfuerzos máximos) son necesarias para el gran aumento de resistencia y deformación experimentado.

No se puede comparar las fallas de la flexión en dos direcciones por falta de teoría, pero si los resultados de flexión cilíndrica (la misma fuera del plano), los cuales son congruentes con la falla por agrietamiento en la zona a de los muros, pero con la particularidad de que en estos modelos se observa el cambio de lugar de falla a tensión, es decir, agrietamiento donde el esfuerzo del laminado no

aportaba resistencia al sistema mampostería-FRP, no en la mitad del muro, sino en los extremos del laminado que no recubre el total del área superficial.

2.2.5 Simulación Numérica de Mampostería Reforzada con FRP (PET)

Rahman y Ueda (RAHMAN y UEDA, 2011) son los últimos autores traídos a mención con sus modelos numéricos-experimentales donde se mida la resistencia a cortante (y flexión indirecta) de la mampostería reforzada con un nuevo tipo de fibra en el FRP, todo presentado en el trabajo de título “Simulación Numérica de Mampostería Adaptado con FRP y Cargado Lateralmente”.

2.2.5.1 Resumen

El PET (Polyethylene Terephthalate) o Tereftalato de Polietileno es un nuevo tipo de fibra (aparte de los comunes CFRP y GFRP) que debido a su alta ductilidad y bajo costo puede hacer parte del FRP para reforzar estructuras (PET-FRP), tales como la mampostería. Los autores prueban la eficacia como refuerzo de este tipo de material en micromodelos simplificados de mampostería, resaltando la unión FRP-Ladrillos y Ladrillos-Mortero para analizar el comportamiento a cortante de un muro cargado y recargado. Micromodelos en tres dimensiones con modelamiento especial de la interfaz (mortero, unidades y FRP modelados con las propiedades más simples) resueltos por análisis de elementos finitos, comprobados con simulaciones experimentales a ensayos de cargas horizontales. Además los modelos se caracterizan por la suposición de resistencia de esfuerzos normales por el mortero y las unidades, y el esfuerzo cortante por la interfaz unidades-mortero (aplicación del criterio de Mohr-Coulomb). La transmisión del esfuerzo cortante entre el ladrillo y el FRP se realiza a través del adhesivo epoxi,

considerando al FRP como un material elástico-lineal que actúa a tensión el cual solo depende del módulo de elasticidad, resistencia última y máxima elongación.

Se basaron las simulaciones en dos muros de mampostería simple y dos con configuraciones de refuerzo de FRP (uno con refuerzo completo y otro con fibra en 40% de su área). Se utilizaron ladrillos de arcilla con mortero simple de 10 mm de espesor y refuerzo PET unidireccional de láminas completas o de 80 mm de ancho (resistencia a tracción de 740 MPa y 10% de elongación máxima). Los modelos experimentales y numéricos fueron pre-comprimidos (100 kN de carga) y probados a cargas monolíticas laterales de cortante.

2.2.5.2 Resultados de Rahman y Ueda (RAHMAN y UEDA, 2011)

La interfaz depende numéricamente de la energía de fractura y de la rigidez del muro, luego del esfuerzo pico se pierde la cohesión y los esfuerzos están determinados solo por la energía de fractura hasta llegar a un cortante residual; cuando existe aumento en la compresión en la mampostería se presenta un incremento del esfuerzo cortante, y cuando existe un aumento en la tensión, disminuye el esfuerzo cortante (intento de separación de la interfaz). En general, todos los resultados de los modelos numéricos fueron comprobados por los experimentales.

Se demostró que una baja relación longitud/altura produce menor resistencia a cortante, ya que a mayor altura, la mampostería está más cerca de la falla a flexión (más perjudicial). Inicialmente en la mampostería sin refuerzo las grietas por la falla a flexión solo se presentaron en la mitad de los muros (comprobado experimentalmente) y no se propagaron al resto de los mismos; mientras que la falla a cortante se dio como deslizamiento en el pie del muro (acompañada por grietas de aplastamiento), y luego por grietas en la mitad de la estructura hasta llegar al pie de la misma. No se presentaron fallas diagonales en ninguno de los

casos sin refuerzo y aquellos con refuerzo completo en el área superficial presentan falla en la base de los muros (separación de la interfaz), no existe deslaminación del FRP ni fallas por agrietamiento (falla prematura); mientras que las estructuras con PET al 40%, se presenta una falla diagonal a cortante, terminando con aplastamiento en la base del muros, sin exponerse deslaminación (Figura 18).

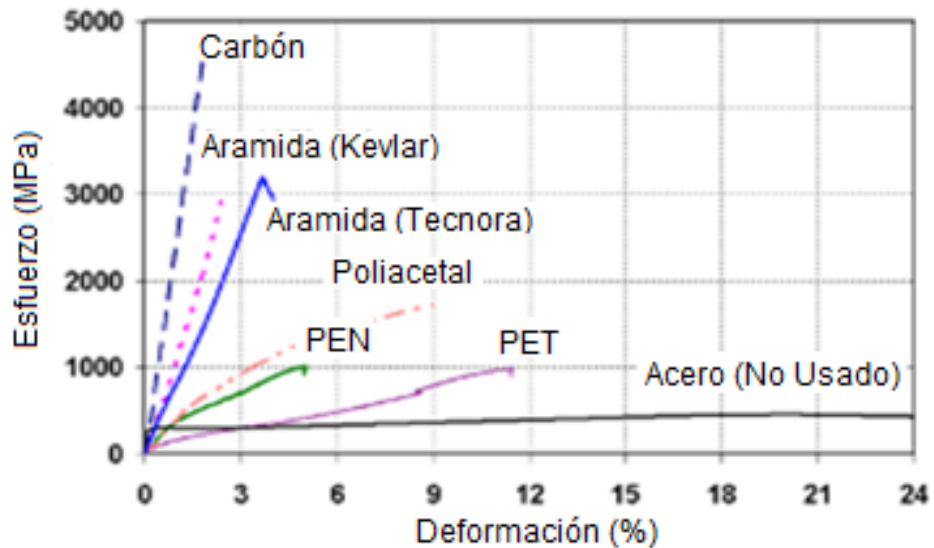
Figura 18. Tipo de Falla de los modelos experimentales.



Fuente: (RAHMAN y UEDA, 2011).

En el modelo numérico, los autores no establecieron el confinamiento del muro por el FRP, por lo que se vio un modelo numérico con un poco más de rigidez y resistencia. En general, se estimó bien el comportamiento del muro con FRP; el aumento de resistencia para los muros con refuerzo total y parcial fueron para el experimental del 90% y 46%, y para el numérico, 57% y 10%, siendo estos últimos más conservadores debido a lo propuesto. Se concluyó además que con el FRP se logró una gran ganancia de ductilidad en la mampostería, lo que es más importante que ganar resistencia, debido a la fragilidad de estas estructuras; El PET funcionó bien a pesar de su baja resistencia pero alta energía de fractura y deformación (Figura 19), pero se recomendó por parte de los autores el aumento de investigación en aplicación de anclajes externos del FRP para proporcionar mejores beneficios mecánicos a este sistema.

Figura 19. Curva esfuerzo-deformación de algunos tipos de fibra de FRP.



Fuente: Modificado de (RAHMAN y UEDA, 2011).

2.2.5.3 Análisis para el Estudio a Cortante

Los modelos son muy detallados y muestran resultados muy conservadores, cualidad necesaria para las simulaciones numéricas en general, ya que por la mayoría de características casi perfectas de estos (como la unión entre materiales) se debe tener una incertidumbre mayor sobre los resultados obtenidos. Al detallar cada componente del micromodelo y las uniones de estos, de gran importancia para una buena simulación numérica se puede aumentar la confiabilidad en ellos a pesar de que no muestra visualmente los resultados, sino por detalles y graficas carga-defomación.

Rahman y Ueda (RAHMAN y UEDA, 2011) concluyen un buen aumento de resistencia, además de detallar correctamente el comportamiento a cortante y como este puede ser afectado por la flexión, la cual genera separación de la interfaz en la base (deslizamiento) o aplastamiento en un extremo del muro (nueva

conclusión para este estudio). Cabe resaltar que la falta de laminado diagonal a la mampostería, el recubrimiento total a lado y lado es más eficiente como refuerzo, entendiéndose que la falla a flexo-cortante en la base es la más difícil de alcanzar en este caso.

2.3 Comportamiento del Sistema Muro-FRP según los Modelos Históricos

El comportamiento mecánico de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP depende de los elementos principales que conforman su geometría y de las condiciones de carga a los cuales este sometido el modelo (*Tabla 3*). Resaltando que las características del mortero de pega no son tenidos en cuenta para el análisis de las mejoras de resistencia del sistema mampostería-FRP en casi ningún modelo estudiado; que las unidades o ladrillos pueden ser perforados o macizos (ya que no influyen en la colocación del refuerzo externo), y que la configuración del laminado (o tejido) de refuerzo afecta en mayor proporción la resistencia de los muros que sus características mecánicas.

2.3.1 Comportamiento Mecánico y Desempeño del FRP

Los resultados de los modelos experimentales son sencillos de tabular según las observaciones físicas en cada una de las simulaciones y resultados expuestos en cada uno de los trabajos relaciones en este estudio. Mientras tanto para los modelos numéricos se realiza un proceso similar de recolección de resultados contando con más datos numéricos que físicos pero resaltando que en la medición

Tabla 3. Resumen de las características principales de los modelos.

Modelos Históricos	Unidades	Tipo de FRP	Resist. Tensión FRP	Condiciones Cargas
TRIANTAFILLOU (1998)	Arcilla perforados	CFRP-epoxi	-	Flexión In* Flexión Out**
GERGELY et al. (1999)	Concreto	CFRP-epoxi	-	Cortante Flexión Out**
FAELLA et al. (2004)	Tufa	CFRP-mortero	1600 MPa	Cortante
KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU (2005)	Arcilla	GFRP-epoxi CFRP-epoxi	2000 MPa 3500 MPa	Compresión
SANTA MARIA et al. (2006)	Arcilla perforados	CFRP-epoxi	3500 MPa	Cortante
WANG et al. (2006)	Arcilla	GFRP-epoxi	1507 MPa	Cortante
ELGAWADY et al. (2006)	Arcilla perforados	GFRP-epoxi CFRP-epoxi AFRP-epoxi	3450 MPa*** 2800 MPa*** 2880 MPa	Cortante-Flexión
ROUGIER y LUCCIONI (2006)	Arcilla	CFRP-epoxi	960 MPa	Compresión Cortante
MILANI ET AL (2006)	Arcilla	CFRP-epoxi	3430 MPa	Compresión
HAMED y RABINOVITCH (2007)	-	-	-	Flexión Out**
MILANI (2009)	Arcilla	GFRP-epoxi CFRP-epoxi	-	Flexión Out** Flexión Múltiple
RAHMAN y UEDA (2011)	Arcilla	FRP(PET)-epoxi	740 MPa	Cortante

*Flexión en el plano del muro **Flexión fuera del plano del muro (cilíndrica) ***Mayor resistencia entre los FRP usados.

de estos (no objetivo de este estudio) hasta el análisis del más mínimo detalle es de vital importancia para medir su eficiencia y dependen del conocimiento en la modelación de los autores específicos. La falla se presenta generalmente cuando y donde se produzcan esfuerzos máximos medidos y la deslaminación se exhibe en las zonas entre el muro y el FRP donde se demuestra deformaciones muy grandes entre las superficies objeto.

En esta sección se tabulan los resultados mencionados de una forma simplificada y según el análisis realizado de cada uno de los modelos en el capítulo 2. Se muestra un resumen del comportamiento límite de los modelos revisados, resaltando la configuración externa del FRP¹, los modos de falla², la presencia o no de deslaminación³ al tiempo del colapso, el incremento máximo de resistencia mecánica⁴ y deformación⁵ (transversal o longitudinal) presentado, y el porcentaje de elongación⁶ alcanzado por la fibra del compuesto tratado. Las tablas referidas (Tabla 4, *Tabla 5* y *Tabla 6*) presentan estos valores dependiendo del modelo y según las condiciones de cargas, ya que este último término es de vital importancia para entender y comparar la falla de un muro reforzado con uno simple. Esta tabulación se realiza contando con los datos finales de cada uno de los modelos, pero cabe resaltar que para el análisis de los modelos numéricos solo se muestran sus resultados en particular y no los de las simulaciones experimentales o cálculos analíticos alternos.

2.3.2 Descripción de los Modos de Falla Según la Condición de Carga

En síntesis, se puede catalogar el comportamiento de la mampostería reforzada externamente con FRP según los modelos estudiados bajo muros a compresión, cortante, flexión en el plano (considera el cortante-flexión) y flexión fuera del plano (considera otros tipos de flexión). Resaltando el aumento de resistencia en todos

los casos, desaprovechamiento parcial del FRP y la deslaminación como sinónimo principal de falla e inmediato colapso de la estructura.

A *compresión* la mampostería sufre aplastamiento (la interfaz unidades-mortero falla pero no interfiere la estabilidad del muro por que el FRP lo protege, en contrario a los modelos sin refuerzo) (*Figura 20*) y como resultado de este, las deformaciones transversales aumentan provocando deslaminación donde las unidades fallen completamente, el adhesivo ya no actúa como unión de elementos y se presentan las mayores grietas (esfuerzos últimos) según la geometría del muro (generalmente en los extremos del mismo). Entre más compresión sufra la mampostería menor efecto tendrá el FRP, el cual posee un límite para contrarrestar los efectos de compresión con su resistencia a la tensión. Definitivamente la mejor opción de refuerzo a compresión es el del recubrimiento área superficial completa (a lado y lado del muro), esto para contrarrestar las deformaciones nombradas, aumentar el confinamiento, la estabilidad y resistencia de la estructura en general.

A *cortante* los muros de mampostería pueden fallar de dos formas, por separación de la interfaz (deslizamiento) en la base del muro con algunos casos de deslaminación cuando existe flexión apreciable (muros esbeltos) o juntas prefalladas por acción de sismos (FRP como refuerzo-reparador), y por agrietamiento de tensión diagonal cuando existe acción de cortante puro (fallas en concordancia con los modelos de muros sin refuerzo) (*Figura 20*). Existe ganancia de resistencia y deformaciones en general con refuerzo parcial por bandas o completo (a lado y lado del muro) siempre y cuando la fibra del FRP tenga la dirección de la diagonal del muro (45°), la cual es la más provechosa de las configuraciones. Cabe resaltar que a cortante la elongación del laminado es más baja de la experimentada por compresión y flexión, esto debido a que las propiedades del FRP no le permiten trabajar tan efectivamente a cortante como a tensión, tal como sucede cuando son tensionados por el aumento de deformación transversal de la compresión o por la

curvatura generada en la flexión. Existe un aproximado 50/50 de posibilidades de que exista deslaminación.

Por su lado, a *flexión en el plano* los muros tienden a comportarse adecuadamente con refuerzo completo o por bandas de fibras horizontales (0°), aumentando la resistencia y las deformaciones (de los esfuerzos de tensión), pero con la acción de un pequeño cortante (generado por la flexión) que no permite el desempeño total de la fibra y genera fallas por separación de la interfaz en la base del muro con (o sin) agrietamiento en la zona a compresión (aplastamiento) y deslaminación del FRP (no se presenta agrietamiento cruzado como en los modelos simples debido al aumento de resistencia y la presencia del aplastamiento) (*Figura 20*).

Finalmente, a *flexión fuera del plano* (cilíndrica) la mampostería sufre curvaturas fuera del plano que genera en su sección esfuerzos de tensión y compresión, en algunos casos el FRP aumenta la resistencia a tracción de estas estructuras a tal punto de generar aplastamiento en la mitad del muro, pero la falla común sigue siendo agrietamiento por tensión donde el laminado se desprenda por acción de la misma curvatura del muro y los esfuerzos generados (correspondencia con el comportamiento de los muros sin refuerzo) (*Figura 20*). El refuerzo por láminas verticales (90°) (a lado y lado del muro o solo en el lado a tensión) es el más usado en estos casos, ya que la dirección de la fibra permite el comportamiento adecuado detallado.

Figura 20. Fallas típicas de los sistemas muro-FRP más su deslaminación.



Tabla 4. Resumen del comportamiento límite de los modelos experimentales.

Modelos Experimentales	Condiciones de Cargas	Configuración FRP¹	Falla General²	Presenta Deslaminación³
TRIANAFILLOU (1998)	Flexión In*	Laminas (50 mm) en la dirección de flexión	Agrietamiento en la zona a tensión	Si
	Flexión Out**	Laminas (50 mm) en la dirección de flexión	Aplastamiento en la zona a compresión	-
GERGELY et al. (1999)	Cortante	Completo con fibra en la dirección diagonal	Separación de la interfaz en la base del muro	-
	Flexión Out**	Completo con fibra en dirección vertical	Agrietamiento en la mitad del muro	Si
FAELLA et al. (2004)	Cortante	Completo con fibra bidireccional	Agrietamiento por tensión diagonal	Si
KREVAIKAS y TRIANAFILLOU (2005)	Compresión	Confinamiento Completo	Aplastamiento con grietas en los extremos del muro	Si
SANTA MARIA et al. (2006)	Cortante	Laminas (300 mm) en las diagonales del muro	Agrietamiento por tensión en ambas diagonal	Si
WANG et al. (2006)	Cortante	Laminas en las diagonales del muro	Separación de la interfaz en la base del muro	Si
ELGAWADY et al. (2006)	Cortante-Flexión	Completo	Separación de la interfaz y agrietamiento en la base del muro	Si

*Flexión en el plano del muro

**Flexión fuera del plano del muro (cilíndrica)

Tabla 5. Resumen del comportamiento límite de los modelos numéricos.

Modelos Numéricos	Condiciones de Cargas	Configuración FRP ¹	Falla General ²	Presenta Deslaminación ³
ROUGIER y LUCCIONI (2006)	Compresión	Completo	Aplastamiento en las laterales del muro	-
	Cortante	Completo	Agrietamiento por tensión diagonal	-
MILANI et al. (2006)	Compresión	Laminas (12.5 mm)	Aplastamiento con grietas distribuidas en el muro	Si
HAMED y RABINOVITCH (2007)	Flexión Out**	Laminas	Agrietamiento por tensión y deslaminación en mortero-FRP	Si
MILANI (2009)	Flexión Out**	Lamina horizontal	Agrietamiento en los extremos de la unión FRP-unidades	Si
	Flexión Conjunta	Dos Laminas (100 mm) horizontales	Agrietamiento generalizado	Si
RAHMAN y UEDA (2011)	Cortante	Completo	Separación de la interfaz en la base del muro	No

*Flexión en el plano del muro

**Flexión fuera del plano del muro (cilíndrica)

Tabla 6. Resumen del desempeño del FRP como refuerzo en los modelos históricos.

Modelos Históricos	Condiciones de Cargas	%Aumento Resistencia ⁴	%Aumento Deformaciones ⁵	%Deformación del FRP ⁶
TRIANTAFILLOU (1998)	Flexión In* Flexión Out**	970% 965%	-	-
GERGELY et al. (1999)	Cortante Flexión Out**	1100% 3400%	780% 780%	5% 21%
FAELLA et al. (2004)	Cortante	130%	-	-
KREVAIKAS y TRIANTAFILLOU (2005)	Compresión	185%	29%	-
SANTA MARIA et al. (2006)	Cortante	84%	150%	-
WANG et al. (2006)	Cortante	25%	-	-
ELGAWADY et al. (2006)	Cortante-Flexión	190%	-	50%
ROUGIER y LUCCIONI (2006)	Compresión Cortante	11% 190%	120% 270%	- -
MILANI et al. (2006)	Compresión	150%	-	-
HAMED y RABINOVITCH (2007)	Flexión Out**	20%	65%	-
MILANI (2009)	Flexión Out** Flexión Conjunta	1200% 1250%	- -	- -
RAHMAN y UEDA (2011)	Cortante	57%	-	-

*Flexión en el plano del muro

**Flexión fuera del plano del muro (cilíndrica)

3. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio detallado sobre el comportamiento mecánico de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP fundamentado en el análisis de modelos experimentales y numéricos. Efectuando un completo marco teórico de las nociones básicas de la temática en cuestión y un completo estado del arte sobre dichos modelos, resaltando la identificación clara de los componentes básicos (y forma de unión), tipos de fallas y ventajas mecánicas del refuerzo tratado.

Dentro de la estructura de los muros de mampostería reforzados externamente con FRP (pega, unidades, FRP y adhesivo), los mampuestos deben ser regidos y dispuestos según las normativas vigentes de construcción, y el refuerzo debe ser el que brinde mejores beneficios de resistencia (comerciales). Las características de los modelos evaluados y de la investigación alterna clarifica el tipo de elementos más común que conforman estas estructuras y su forma de unión:

- El componente “pega” puede variar en composiciones y espesores, desde un mortero simple conformado por agregados finos, cemento y agua, hasta un mortero modificado con aditivos o agregados de puzolana o arena gruesa, y con anchos de junta entre 10 y 30 milímetros.
- El componente “solido” puede ser de casi cualquier material (arcilla, concreto, entre otros) y tipo (perforados o macizos), siempre y cuando su superficie expuesta (área “soga”) pueda ser tratada correctamente para garantizar la aplicación del adhesivo que une el FRP. Los ladrillos de arcilla son lo más comunes en los modelos estudiados debido a su alta predominancia en las estructuras de mampostería (si las pruebas se

realizan con ladrillos de este tipo pueden usarse en bloques más resistentes). Su disposición general más común es del tipo “enlace soga”.

- Los polímeros reforzados con fibra son de los tipos más comerciales y resistentes (para Colombia un ejemplo común son los SikaWrap® y Sika CarboDur®), singularizando que el componente de la matriz es despreciable debido a su participación casi nula en el suministro de resistencia al material, y que las fibras más utilizados son el carbón y el vidrio, el CFRP es el material más resistente y deformable probado en la actualidad, y el GFRP de mejor aspecto físico y confiable también para este sistema de refuerzo (aumenta ampliamente la deformación de los muros).
- El adhesivo recomendado es la resina epoxi (en Colombia el SikaDur®) debido a sus condiciones de unión sobre cualquier tipo de mampostería usando la técnica manual más común, el cual con el tratamiento de limpieza y rugosidad sobre las unidades sólidas y adherido a base de una o dos capas, logra un buen funcionamiento del FRP.
- Los modelos numéricos estudiados en este trabajo de grado se caracterizan por ser micro-detallados y homogenizados, debido a la buena obtención de resultados numéricos claros, mejor suposición de sus uniones (enlace soga y adhesivo) y buenas aproximaciones de su comportamiento.

En general con esta investigación y análisis de modelos se encontró buena correspondencia entre el comportamiento empírico del marco teórico y el descrito por cada una de las simulaciones recopiladas en este trabajo. La ganancia de resistencia y deformación a compresión, cortante y flexión es evidente en las Secciones 2.1-2.2 y su resumen claro se encuentra en la Sección 2.3, resaltando que la geometría, la resistencia de los materiales, las propiedades de las uniones

entre ellos, daño existente y efectivamente la condición de carga modifican ampliamente la resistencia, modo de falla y colapso de las estructuras (la mampostería es poco resistente a cargas laterales por lo cual el menor aumento de carga soportada se presenta en estos casos).

Los muros reforzados externamente mantienen la mayoría de modos de falla de la mampostería simple a costa del aumento de resistencia, rigidez y energía de deformación, la separación del interfaz sigue siendo el precursor de la falla pero no más del colapso, el cual es regido por la deslaminación y el agrietamiento de las unidades bajo esfuerzos máximos de compresión y tensión (mayor debilidad a tensión). De acuerdo al uso de FRP como refuerzo/reparador de la mampostería se puede concluir lo siguiente:

- Al FRP no se le aprovechan las altas deformaciones que puede soportar (solo se presenta un máximo del 50%), ya que las unidades se encargan de resistir la gran parte de la carga y ellos determinan la comunión entre pérdida de estabilidad final y el desprendimiento del laminado.
- La orientación de la fibra de FRP afecta la resistencia y rigidez del muro, las fibras en dirección diagonal (45°) son buenas para el cortante, las verticales para la flexión fuera del plano o cilíndrica, y las horizontales para la compresión y la flexión en el plano.
- La longitud del anclaje del FRP (área adherida al muro) puede aumentar significativamente la resistencia, siempre existe un valor de área mínimo y cantidad de adhesivo que funciona correctamente, permitiendo la falla general antes o durante la deslaminación. Se permite el uso de bandas o de refuerzo completo según el tipo de carga.

4. RECOMENDACIONES

Se logró resumir los comportamientos de la mampostería reforzada externamente con FRP según las condiciones de carga más comunes. Sin embargo, existe una falta de conocimiento en comportamiento experimental y modelamiento numérico más detallado, por lo que se recomienda:

- Aumentar el estudio experimental en el uso del FRP para reforzar externamente la mampostería sometida a varios efectos de carga y con configuraciones de laminado diferentes a las resumidas aquí.
- Buscar soluciones experimentales o numéricas más eficaces en la ubicación del FRP para reforzar muros a cortante, los cuales son los que presentan menor aprovechamiento del laminado.
- Aumentar el estudio en la Homogenización de modelos numéricos, ya que estos procedimientos presentan una alternativa más económica, rápida y eficaz de simulación; o en su defecto realizar micromodelos numéricos de mayor tamaño que aseguren el comportamiento típico de la mampostería.

BIBLIOGRAFÍA

ALTIN, Mustafa; CONGURCU, Mustafa; DÖNDÜREN, Sami y KARMANLI, Mehmet. Experimental Study of Some Masonry-Wall Coursework Material Types Under Horizontal Loads and their Comparison. Trabajo de Investigación. Turquía: Universidad de Selcuk, 2011.

CHANSAWAT, Kasidit; KACHLAKEV, Damian; MILLER, Thomas; POTISUK, Tanarat y YIM, Salomon. Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates. Trabajo de Investigación: Reporte Final. Estados Unidos: Oregon Department of Transportation Research group y Federal Highway Administration, Mayo, 2011.

CHONG, V.L.; SOUTHCOMBE, C. y MAY, I.M. The behaviour of laterally loaded masonry panels with openings. En: Proceedings of 3rd Int. Masonry Conf. Proc. Brit. Mas. Soc. Londres. p. 178-182, 1994.

DARYUSH, Masoud; SCHUMACHER, Ann y MAREFATH, Mohammad. Numerical Modeling of In-Plane Behavior of URM Walls and an Investigation into the Aspect Ratio, Vertical and Horizontal Post-Tensioning and Head Joint as a Parametric Study. En: Archivos de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica, 2009, vol. IX N°1, p. 6-27.

EHSANI, M.R. y SAADATMANESH H. Seismic Retrofit of URM Walls with Fiber Composites. En: The Masonry Society Journal, 1996, vol. 14, N°2, p.63-72.

EHSANI, M.R. y SAADATMANESH H. Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlays. En: Journal of Composites for Construction. Febrero, 1997, vol. 1 N°1, p.17-25.

ELGAWADY, Mohamed; LESTUZZI, Pierino y BADOUX, Marc. A Seismic Retrofitting of Unreinforced Masonry Walls Using FRP. En: Composites, Part B: Engineering. Suiza: Elsevier Ltd, p. 148-162, 2006.

FAELLA, Ciro; MARTINELLI, Enzo; NIGRO, Emidio y PACIELLO, Sergio. Tuff Masonry Walls Strengthened with a New Kind of C-FRP Sheet: Experimental Tests and Analysis. Canada: 13th World Conference on Earthquake Engineering. Agosto, Paper N°923, 2004.

FLORES, Luis. Reforzando Edificaciones con Fibra de Carbono. En web: www.institutoconstruit.org. Perú: Gerencia Administrativa de Constructora RF SA, 2010.

FEFY CO LLC. Design Manual for the Tyfo Fibrwrap Systems. Nancy Ridge Technology Center: Revision 8, 2007.

GERGELY, Janos; VANDERGRIFT, Jon y YOUNG, David. CFRP Retrofit of Masonry Walls. Trabajo de Investigación. Estados Unidos: University of North Carolina, 1999.

HAMED, Ehab y RABINOVITCH, Oded. Geometrically nonlinear effects in the flexural response of masonry walls strengthened with composite materials. En: Journal of Mechanics of Materials and Structures. Mayo, 2007, vol. 2, N°5, p. 829-855.

KALPAKJAN, Serope; SÁNCHEZ, Gabriel y SCHMID, Steven. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 4ed. Mexico: Pearson Educación, 2002. p. 496-503.

KREVAIKAS, Theofanis y TRIANTAFILLOU, Thanasis. (2005). Masonry Confinement with Fiber-Reinforced Polymer. En: Journal of Composites for Construction. Abril. vol. 9, N°2, p. 128-135.

LEAFER, Debra y HONG, Linh. Micro vs. Macro Models for Predicting Building Damage Underground Movements. En artículo web: hdl.handle.net. Irlanda: University College of Dublin, 2008.

LIDERING. Resinas Epoxi. 2007. En web: www.LIDERING.com.

LOURENÇO, P.B. Experimental and Numerical Issues in The Modeling Of the Mechanical Behavior of Masonry. En: Articulo CINME. Portugal: Universidad de Minho, 1998.

MILANI, G.; ROTUNNO, T.; SACCO, E. y TRALLI, A. Failure load of FRP strengthened masonry walls: Experimental results and numerical models. En: SDHM (Tech Science Press), 2006, vol. 2, N°1, p. 29-50.

MILANI, Gabriele. Homogenized Limit Analysis of FRP-Reinforced Masonry Walls out of Plane Loaded. En: Comput Mech. Septiembre. p. 617-639. Suiza: Springer Verlag Publishing, 2009.

MOLANO, Angélica. Evaluación Sísmica de Mampostería no Estructural Reforzada con Listones de Madera. Trabajo de Grado: Ingeniería Civil. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2005.

MOSALLAM, A.S. Out-of-plane flexural behavior of unreinforced red brick walls strengthened with FRP composites. En: Compos Part B Eng 38, 2007, p. 559-574.

ÖZEN, Garip. Comparison of Elastic and Inelastic Behavior of Historic Masonry Structures at the Low Load Levels. Trabajo de Grado: The degree of Master of Science in building science in architecture. Turquía: Universidad Técnica del Medio Oeste, 2006.

RAHMAN, Ataur y UEDA, Tamon. Numerical simulation of FRP retrofitted laterally loaded masonry. Trabajo de Investigación. Japon: Universidad de Hokkaido, 2011.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE (NSR-10). Mampostería Estructural, Título D, 2010.

ROUGIER, Viviana y LUCCIONI, Bibiana. Modelación Numérica de Mampostería Reforzada con Materiales Compuestos. En artículo web: www.frcu.utn.edu.ar. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional y Universidad Nacional de Tucumán, 2006.

SANTA MARIA, Hernán. ALCAINO, Pablo. y LUDERS, Carl. Experimental Response of Masonry Walls Externally Reinforced with Carbon Fiber Fabrics. Estados Unidos: 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Abril, 2006. Trabajo N°1402.

SHRIVE, Nigel; MASIA, Mark J. y LISSEL, Shelley L. Strengthening and Rehabilitation of Masonry Using Fiber Reinforced Polymers. Canadá: Department of Civil Engineering, Universidad de Calgary, 2001.

SIKA. Sika ® CarboDur ® Sistemas de Reforzamiento Estructural. 2007. En web: www.sika.co.co

TRIANAFILLOU, T.; BAKIS, C.; BANK, L.; BROWN, V.; COSENZA, E. DAVALOS, J. LESKO, J. MACHIDA, A. y RIZKALLA, S. Fiber-reinforced polymer composites for construction – State of the art review. En: Journal of Composites for Construction. Mayo, 2002, vol. 6, N°2. Estados Unidos: Sociedad Americana de Ingenieros Civiles ASCE.

TRIANAFILLOU, Thanasis. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. En: Journal of Composites for Construction, 1998, p. 96-104.

UNIVERSIDAD DE CASTILLA. Materiales Compuestos Reforzados con Fibras. En web: www.uclm.es. España: Material de apoyo de clases teóricas, 2005.

VIVIESCAS, Álvaro. Modelos Simples para el Análisis de Muros de Obra de Fábrica Cargados en su Plano. Tesis Doctoral. España: Departament d'Enginyeria de la Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.

WANG, Q.; CHAI, Z.; HUANG, Y. y ZHANG, Y. Seismic shear capacity of brick masonry wall reinforced by GFRP. En: Asian Journal of Civil Engineering, 2006, vol. 7, N°6, p. 562-580. China: College of Civil Engineering, Huaqiao University.

WEATHERHEAD, R.G. FRP Technology: Fiber Reinforced Resin System. Inglaterra: Applied Science Publishers Ltd, 1980, 462p.

ANEXO A - BASES TEÓRICAS REFERENTES A LA MAMPOSTERÍA

Definición y Contexto Histórico.

La Mampostería es un tipo de material estructural heterogéneo de fácil implementación en la construcción que posee características anisótropas; también es definida como un tipo de técnica de construcción que usa bloques compilados unos sobre los otros (aparejo) unidos o no con un material ligante, que permite el levantamiento de estructuras simples o complejas. La mampostería es una parte fundamental de las estructuras de construcción más antiguas del mundo, ya que genera mínimos desperdicios en su construcción, forma fachadas portantes y es apta para grandes alturas. El uso de esta técnica se inició en las poblaciones primitivas en el año 8000 A.C. para construir casas a base de apilar bloques de piedra y asentar sus irregularidades con barro, luego se extendió rápidamente por todo el mundo siendo implementada por Egipcios, Griegos y Romanos, hasta alcanzar su máxima expresión en las época de la Arquitectura Gótica y el Renacimiento en Europa con la construcción de iglesias, acueductos, templos y puentes (*Figura 1*), terminando en nuestros días con la construcción de estructuras de gran uso actual (LOURENÇO, 1998). Sin embargo, a pesar de su antigüedad es definido como “un material que posee tantas propiedades heterogéneas que su estudio aún no está completo” (VIVIESCAS, 2009).

Actualmente, la mampostería puede ser empleada para construir casas, puentes, caminos, arcos, pozos, muros estructurales, entre otras estructuras, pero su uso se limita por las condiciones sísmicas del lugar de construcción y requerimientos del mismo, ya que la mampostería puede ser altamente frágil y muy susceptible a los efectos físicos de su entorno.

Figura 1. Acueducto Pon du Gard, Nimes, Francia. Mampostería colocada en seco formando arcos superpuestos.



Fuente: (LOURENÇO, 1998).

Mampuestos

La mampostería consta de dos componentes esenciales (mampuestos), el componente “sólido” y el componente “pega”. El primero es un elemento regular solido en forma de paralelepípedo (perforado o no), llamado Unidad, Bloque o Ladrillo, hecho de arcilla, adobe, concreto, cerámica, piedras labradas u otro material de fácil endurecimiento con alta resistencia a la compresión; el segundo componente, la pega, es una Argamasa o Mortero, principalmente compuesto de cal o cemento, arena y agua, susceptible a adición de polvo de ladrillo y algunos aditivos (impermeabilizantes, acelerantes, etc.), este es el encargado del llenado de espacio o juntas entre bloques, uniendo estos y dándole estabilidad a la mampostería. Cuando existen ladrillos perforados vertical u horizontalmente, un componente adicional de la mampostería es el componente de relleno (mortero), el cual es utilizado para rellenar las unidades o envolver un posible refuerzo dentro de las mismas.

Muros de Mampostería

Los muros de mampostería (en adelante denominados como “muros” o “mampostería”) son estructuras monolíticas construidas a base de mampuestos que tienen la función de soportar cargas verticales y horizontales, ya sea por efecto del peso propio de partes de una estructura que sobre ellos descansan, por cargas de gravedad temporales, por cargas de sismo o de viento, dentro de una edificación que ellos se encargan de formar (VIVIESCAS, 2009).

Son estructuras simples y fáciles de construir debido a la buena comunión que existen entre sus componentes, los bloques y el mortero se unen fácilmente. Sin embargo, debido a esa misma simplicidad, una de las principales características negativas de estas estructuras, es que poseen riesgo de inestabilidad por fatiga o degradación periódica de su resistencia, por lo cual han sido catalogados a través de los años como frágiles e incapaces de soportar sismos (LOURENÇO, 1998), esto causado entre otras cosas por el fenómeno de reblandecimiento, que “es la pérdida gradual de sus propiedades mecánicas bajo el incremento sostenido de carga aplicada (generalmente tensión), produciendo un aumento progresivo de tamaño en las micro fisuras (propias de cada sólido) de los bloques hasta lograr el agrietamiento total y el colapso del material” (LOURENÇO, 1998). En general, los muros de mampostería son diseñados para resistir cargas de compresión y cortante en su plano, es por eso que bajo efectos de alguna tensión (del sismo) fallan fácilmente, y por ello se le es necesario agregar refuerzo adicional cuando están ubicados en zonas de amenaza sísmica alta (en Colombia: zonas DES).

Requisitos Normativos en Colombia

La mampostería, aunque es una estructura simple, debe cumplir con requisitos físicos y mecánicos para su buen funcionamiento estructural (REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, 2010). La resistencia

a cortante y tensión del conjunto de mampuestos dependen de la resistencia a compresión de los mismos en un 10% y 25% aproximadamente (ÖZEN, 2006).

El mortero de pega debido a su composición tiene mayor número de requisitos, tales como una buena plasticidad, consistencia y que sean fácilmente hidratables. El agua utilizada para la mezcla debe estar limpia y libre de contaminantes (aceites, ácidos, alcoholes, sales o materias orgánicas); la arena o agregados finos deben cumplir con la normativa NTC vigente (Norma Técnica Colombiana) y deben estar libres de materiales contaminantes o que se deshagan fácilmente. La dosificación del mortero depende de las relaciones empíricas existentes y anunciadas por la norma sismo-resistente Colombiana (*Figura 2*), y su aplicación depende de las unidades de mampostería presente, si existen unidades con perforación vertical, el mortero de pega debe ir en el perímetro de las unidades para permitir la unión y al mismo tiempo el paso del refuerzo, pero si las unidades son macizas o de perforación horizontal se debe aplicar mortero en todo el espesor del bloque para permitir un buen enlace unidad-pega.

A demás del control de calidad de los mampuestos, se deben revisar las especificaciones de la mampostería. Los requisitos de resistencia de los muros se acreditan por medio de pruebas experimentales en secciones cortadas de estos (muretes), teniendo en cuenta que si las unidades son perforadas, se realiza comprobación de resistencia en muretes con mortero de relleno en por lo menos 50% de las pruebas. La calidad de la mampostería es satisfactoria si se cumple que el promedio de los valores obtenidos de resistencia a compresión de los muretes, del mortero y las unidades individuales, es mayor o igual al 80% de la resistencia especificada por la NSR-10. Finalmente, es de importancia la protección contra la lluvia, el viento y la exposición excesiva del sol en la etapa de construcción y curado de los muros, la mampostería no debe ser curada mediante riego, se cura humedeciendo con brocha únicamente las juntas de mortero, sin tocar las unidades, esto debe realizarse a una temperatura adecuada y durante mínimo siete días para permitir un correcto funcionamiento de la estructura.

Figura 2. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción.

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad ⁽¹⁾			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión f'_{cp} MPa ⁽²⁾	Flujo en (%) ⁽³⁾	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada ⁽⁴⁾	Cemento para Mampostería ⁽⁷⁾	Arena/Material Cementante ⁽⁵⁾	
							Min.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.0
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.5
				0.5	no aplica	1	2.50	3.0
N ⁽⁶⁾	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.5
				0	no aplica	1	3.00	4.0

Notas:

1. Solo para el diseño de mezclas de morteros en laboratorio, con base en los materiales que van a ser utilizados en obra. El control de morteros en obra se debe realizar de acuerdo con la norma NTC 3546 (ASTM C780).
2. Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días en cubos de 50 mm de lado
3. Ensayo realizado según NTC 4050 (ASTM C91)
4. Se puede utilizar cal hidratada en polvo tipo N o S.
5. Para este cálculo no se incluye como cementante la cal.
6. El mortero tipo N solo se permite en sistemas con capacidad mínima de disipación de energía en el rango inelástico (*DMI*)
7. El tipo de cemento para mampostería (M, S o N) será el mismo que el tipo de mortero de pega.

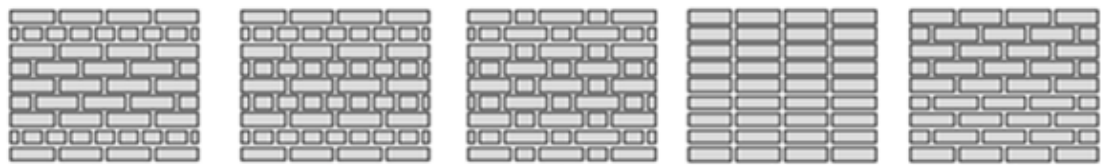
Fuente: (REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, 2010).

Aparejo

La disposición o aparejo de la mampostería es realizado por cualquier conocedor de esta técnica de construcción, dependiendo de las especificaciones geométricas dadas por el constructor y según cálculos de resistencia realizados previamente; las configuraciones más usadas (*Figura 3*) de los muros de mampostería son las presentadas por Lourenço en su investigación (LOURENÇO, 1998), resaltando el “enlace sogá” como el más usado actualmente, ya que es fácil de implementar y con él la mampostería resiste satisfactoriamente las cargas verticales (debido a que las uniones con mortero se encuentran en forma de zig-zag). Además, su

espesor puede ser completo o con relleno de concreto; la configuración en espesor de los mampuestos puede ser plana (espesor igual al ancho de una unidad), en cerradura o en cruz (el espesor es igual al ancho de 2 o más unidades), es usual en la construcción que la mampostería sea plana.

Figura 3. Aparejo más común de la mampostería.



a) Enlace Americano b) Enlace Ingles c) Enlace Flamenco d) Enlace Apilar e) Enlace Soga

Fuente: Modificado de (LOURENÇO, 1998).

Como resultado de este aparejo de bloques unidos con la pega, se crean unas líneas perimetrales de unión entre bloques y rellenas con mortero, las cuales son denominadas como “juntas”, existen juntas horizontales que son las líneas más largas de la mampostería y las juntas verticales que pueden variar de una configuración (enlace) a otra. Las juntas horizontales son conocidas también como “juntas cama” o “bed joints”; mientras que las juntas verticales también reciben el nombre de “juntas de cabeza” o “head joints”. Sumado al fenómeno de reblandecimiento, se pueden crear fallas en los planos de unión entre mampuestos bajo diferentes condiciones de carga y esfuerzos, esto genera grietas que se pueden propagar fácilmente por las juntas mencionadas debido a las bajas propiedades mecánicas que estas poseen y a que también representan la parte más débil de las estructuras de mampostería.

Clasificación

La mampostería puede ser implementada en la construcción de varias formas, los tipos existente son: simple, confinada, reforzada, de cavidad reforzada o reforzada externamente. El tipo simple o no reforzado, se caracteriza por su composición únicamente de unidades y mortero (como se ha explicado), por estar gobernados por esfuerzos de compresión y cortante, y por no ser aptos para su construcción en zonas de amenaza sísmica alta. La confinada es la misma mampostería simple con elementos estructurales de concreto como vigas y columnas en todo su perímetro, que encarcelan el muro para darle mayor estabilidad y resistencia. La mampostería reforzada es aquella que posee refuerzo de hierro o alambre de acero envueltos por mortero dentro de perforaciones presentes en las unidades sólidas, todo unido monolíticamente para contrarrestar los posibles esfuerzos de tensión. La mampostería con cavidad reforzada es aquella que une dos paredes de piezas simples y entre ellas se forma una pared delgada de concreto reforzado, se caracteriza por ser una técnica que da mayor seguridad estructural, pero de poco uso por su alto costo económico. Finalmente, la mampostería reforzada externamente es aquella que posee su refuerzo dentro de su capa de pañete o revoque (en el área superficial), ya sea fijado por clavos o por algún otro conector o anclaje. Los muros de cavidad reforzada, confinada y reforzada externamente son los únicos tipos de estructuras de mampostería que pueden estar compuestas por unidades de tipo macizo (REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, 2010).

Mampostería Reforzada Externamente

La mampostería reforzada externamente es una tipología de construcción de los mampuestos, creada por la necesidad de reforzar y/o reparar muros después de un tiempo de su construcción, es decir, rehabilitar estructuras antiguas. La norma colombiana sismo-resistente certifica el uso de mallas electrosoldadas fijadas por

clavos o alambres en la capa de pañete para fortalecer estas estructuras, teniendo en cuenta un recubrimiento mínimo externo y a la superficie de mampostería de por lo menos 10 y 5 mm respectivamente (espesores de capas de mortero de revoque de 15 a 45 mm y curado de mínimo 7 días).

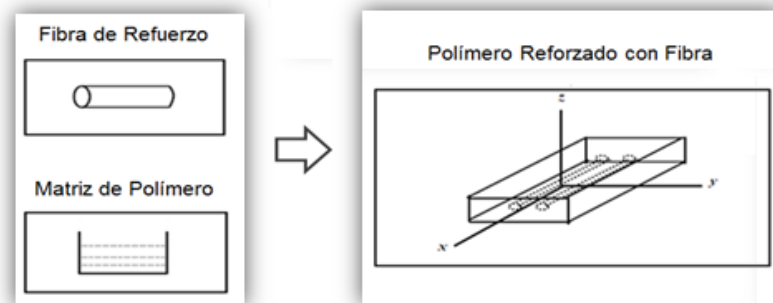
Actualmente se proponen otras técnicas de reforzamiento que deben ser diseñadas garantizando un funcionamiento monolítico con el refuerzo (igual que con mallas) sin afectar drásticamente su volumen, ni su distribución de esfuerzos previos. El espesor mínimo de los muros con refuerzo externo (incluyendo pañete) es de 130 mm, las unidades pueden ser macizas o perforadas de cualquier tipo, el mortero de pega debe cumplir los requisitos ya mencionados para cualquier mampostería y el mortero de revoque o pañete debe cumplir con las normas ASTM vigentes de la Sociedad Americana de Ingenieros (REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, 2010).

ANEXO B - BASES TEÓRICAS REFERENTES A LOS POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA

Definición

Los polímeros reforzados con fibra o conocidos en inglés como “Fiber Reinforced Polimers (FRP)” (también “Fiber Reinforced Plastics”), son materiales plásticos compuestos ortótropos de tensión plana que contienen nervios en su interior (también pueden contener Aditivos) comercializados en forma de láminas o telas, utilizados desde la década de los noventa para aumentar la resistencia de ciertos elementos físicos. Estos, son formados por la introducción de fibras fuertes y rígidas dentro de una matriz polimérica (resina termoestable) más blanda y dúctil (*Figura 4*). Se caracterizan por su buena resistencia (incluso a altas temperaturas), rigidez, alta relación resistencia/peso y deformación/espesor nulo. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras y proporciona ductilidad y tenacidad, mientras que las fibras soportan la mayor parte de la fuerza que se le puede aplicar al material.

Figura 4. Esquema de estructura del FRP.



Fuente: Modificado de (CHANSAWATet al., 2011).

Características Físicas

Las propiedades de resistencia del FRP, así como su rigidez, peso y densidad dependen de sus características internas, es decir, de su relación de forma (longitud / diámetro de la fibra), cantidad de fibras, orientación de las mismas y de su unión con la matriz. Cuando se posee una relación de forma grande, la resistencia aumenta, pero fibras muy largas son difíciles de manipular, por lo cual se prefiere utilizar como refuerzo fibras moderadamente largas con diámetros muy pequeños. Una fracción mayor en volumen de fibras también incrementa la resistencia y la rigidez del FRP, pero se ha establecido por pruebas prácticas recopiladas que un 80% de fibras por unidad de material es un límite máximo válido. Como se anunció también la orientación de las fibras define el comportamiento del FRP (*Figura 4*), sin embargo, también se pueden colocar fibras en direcciones aleatorias dentro de la matriz brindando un comportamiento isotrópico si se requiere (UNIVERSIDAD DE CASTILLA, 2005). Toda composición depende del fabricante y por lo cual actualmente las láminas o telas de FRP se encuentran con configuraciones regulares de fibra (unidireccionales o multidireccionales) y matriz, mientras que la implementación de la dirección de las mismas depende de su uso y del número de capas que se implementen.

Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz, debido a la función de transmisión de esta última. Si la unión es pobre, las fibras pueden desprenderse de la matriz durante la carga, reduciendo la tenacidad y la resistencia a la fractura del FRP. La matriz se encarga de soportar la lámina o tela, transfiriendo la carga a las fibras fuertes y protegiéndolas de daños durante su manufactura y su uso, además se encargan de controlar la propagación de grietas, la conducción de electricidad y proporción de resistencia a ciertas temperaturas de todo el material.

En congruencia, el diseño final de una lámina (o tela) de FRP depende de múltiples factores, tales como la zona a reforzar, el tipo de matriz, el tipo de fibra y

el proceso de fabricación usado. La selección del material para la fibra y el polímero usado para la matriz dependen de sus propiedades y especificaciones físicas requeridas. Por su parte, la selección del proceso de fabricación depende de la forma del FRP (lamina o tela), dirección requerida de la fibra (según la carga) y de las condiciones ambientales (WEATHERHEAD, 1980). En ingeniería, muchos de estos factores no son tenidos en cuenta para el desarrollo del FRP como refuerzo estructural, pero son de gran importancia para establecer las características mecánicas del material analizado y entender su comportamiento; se establece que algunas de las razones para utilizar el FRP como refuerzo estructural son: problemas de durabilidad, inadecuado diseño, ambiente agresivo, incremento de cargas, poca vida útil y la carga accidental posible.

Materiales

El uso de la fibra de vidrio ha sido esencial desde los inicios de desarrollo del FRP en los años noventa, por su fácil manufacturación, buenas propiedades físicas, transparencia (inoloro) y resistencia a altas temperaturas. Pero recientes pruebas experimentales han producido también un aumento indudable en el uso de fibra de carbón, debido a su mayor resistencia y rigidez (mayor costo, de color negro y menos resistencia térmica, pero de mejores características mecánicas). Los polímeros reforzados con fibra de vidrio reciben el nombre de GFRP (Glass Fiber Reinforced Polimer) y con carbón, de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polimer). Otros tipos de fibras usados en la actualidad son la de aramida, asbesto, algodón, sisal, lana y rayon (WEATHERHEAD, 1980), además de otros tipos de fibras reutilizables disponibles en el mercado, tales como los derivados del polietileno, plástico común encontrado en botellas de agua comerciales (*Figura 19 del Capítulo 2 del Trabajo de Grado*).

Por su parte, los materiales de la matriz del FRP, no han sido gran motivo de discusión, pero se resaltan las resinas como las típicas, en esencial resinas de

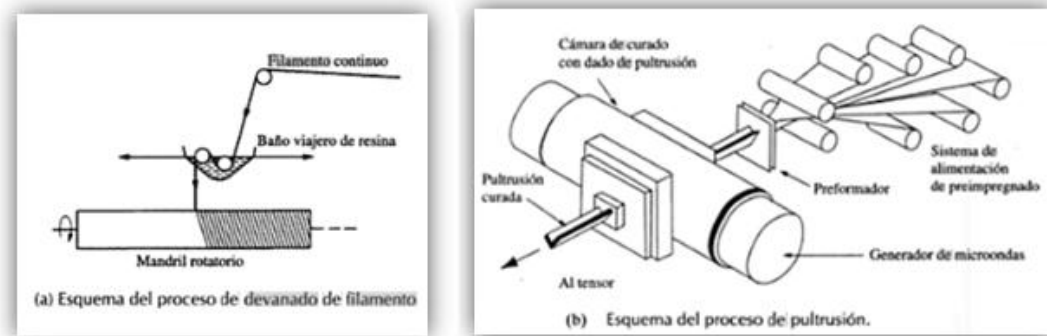
poliéster, epoxi y vinilo. Las más utilizadas son las de epoxi, ya que presentan excelentes propiedades mecánicas, alta resistencia a la corrosión y a temperaturas elevadas, buena humectación (resistente a la humedad) y adherencia, y buen aislamiento eléctrico y químico. Estas propiedades pueden variar según un catalizador (endurecedor, impermeabilizador, etc.) usado en ellas, por lo que son altamente manipulables, aunque de cuidado al moldear y fabricar.

Fabricación

La obtención de la fibra depende del entorno químico u orgánico del cual se obtenga su tejido y de la resina del cual se moldeen, pero su proceso de unión (formación del FRP) se puede dar de varias formas, las más conocidas son los procesos por devanado de filamentos, pultrusión (*Figura 5*) o pulformado (todo proceso que implique fibras y resinas debe venir acompañado con una buena ventilación y la protección adecuada de nariz y manos). El devanado por filamentos, utilizado para la producción de plásticos muy resistentes simétricos y unidireccionales, consiste en la combinación de resina y fibras durante la etapa de curado del FRP, el filamento de refuerzo se envuelve en forma continua en un molde de resina (por medio de un mandril rotatorio) mientras se va impregnando por un baño del mismo polímero hasta su terminado (usado para crear refuerzo de motores, fuselajes, hélices y elementos mecánicos). Por su parte, la Pultrusión (Inventada en 1950) es utilizada para crear láminas de sección uniforme, consiste en jalar el refuerzo a través de un baño de polímero (impregnado a presiones de 400 Psi) y luego por un dado de acero largo y caliente (formado del molde) donde es curado para posteriormente ser cortado en los tamaños deseados (común para crear GFRP y CFRP). Finalmente, el Pulformado, es un proceso de fabricación de productos reforzados sin secciones constantes, en donde continuamente se tira de fibras a través de un baño de polímero hasta ubicarlo entre las dos mitades de un

molde, donde se forma y se cura hasta llegar al producto terminado (común para producir láminas curvas).

Figura 5. Esquema grafico de dos procesos de fabricación del FRP.



Fuente: Modificado de (KALPAKJAN, SÁNCHEZ y SCHMID, 2002).

Adhesivos

Con respecto a su aplicación, el FRP debe trabajar conjuntamente con los elementos que va a reforzar, por lo cual depende de un adhesivo para funcionar correctamente, la técnica más común en la aplicación por medio de adhesivos recibe el nombre de Lay-Up, y consiste en la aplicación manual del material pegante en la superficie libre y rugosa de un(os) elemento(s) solido(s). Es por esto que las propiedades de estos adhesivos también son importantes en el reforzamiento con FRP, proporcionando el medio de anclaje principal de este material al elemento a reforzar (Los esfuerzos de unión para FRP debe ser mínimo de 1.4 MPa cuando esta está sometida a cortante o flexión). Los adhesivos son también resinas poliméricas que cumplen dicha función sin afectar las propiedades físicas y mecánicas de los elementos a unir, uno de los más conocidos y utilizados es la resina epoxi. Las resinas de epoxi son adhesivos de polimerización rápida (conversión de monómeros a polímeros – endurecimiento) que poseen como

componentes básicos una resina base y un endurecedor (composición 1:1), y en general permiten la asociación de materiales como el metal, vidrio, cemento, cerámica, madera, plásticos, etc. (aplicando el pegante en solo una de las superficies a unir). Logrando una alta resistencia a la tracción, al impacto, al agua, al aceite y a la mayoría de los productos químicos (LIDERING, 2007).

Los tipos de resina epoxi existentes más comunes en el mercado son la Resina Epoxi Tipo S, N y N5000 (*Figura 6*). Las resinas S son utilizadas para trabajos de mantenimiento y reparación, son adecuadas para producciones en serie con tiempos cortos de manipulación y además poseen polimerización rápida (5 minutos) y color amarillo. Las resinas N son adecuadas para trabajos de producción con montaje y posicionamiento de piezas en varias etapas, poseen polimerización normal (45 minutos) o larga y color amarillo u opaco. Y las resinas N5000 son especialmente adecuadas para conexiones donde el acabado final es importante, poseen tiempos de manipulación corto (20 minutos) y polimerización normal, además son transparentes. Cabe resaltar que también existen adhesivos especiales para metales y de secado rápido, resinas epoxi de polimerización altamente rápida (3 minutos) y que se encargan de unir elementos muy pesados (LIDERING, 2007).

Figura 6. Sugerencia de uso de los tipos de adhesivos epoxi.

	Resina Epoxi S	Resina Epoxi N	Resina Epoxi N 5000	Resina Epoxi Rápida	Resina Epoxi Metálica
Metales (ej: aluminio, plancha de hierro, latón, acero inoxidable)	++	+	++	+	++
Plásticos duros* (ej: PVC rígido)	++	++	++	+	+
Materiales reforzados con fibra (ej: GRP, CFRP, fibra de vidrio)	++	+	++	+	+
Madera	+	+	++	+	+
Corcho	++	++	+	++	+
Productos timbrados (contrachapado)	+	+	+	+	+
Fibra cerámica	+	+	+	+	+
Piedra (mármol, granito, ladrillo, hormigón)	++	++	++	++	+
Goma / elastómeros	-	-	-	-	-

Fuente: (LIDERING, 2007.)

(++) Muy adecuado (+) Adecuado (-) No adecuado

SikaWrap®

Actualmente se puede encontrar al FRP en varias formas comerciales (Figura 7), una de las más comunes es el SikaWrap®, telas compuesta por fibras unidireccionales de carbón o vidrio con matriz de resinas epoxi, que se unen a elementos estructurales con falta de refuerzo por medio de compuestos adhesivos llamados Sikadur®, resinas de impregnación también de epoxi (tipo N5000) utilizadas para adherir los tipos de materiales de construcción más comunes (También se puede encontrar FRP en forma de Sika CarboDur® (láminas de CFRP) unido por medio de Sikadur® 30 (adhesivos y morteros epoxi con resistencia a la tracción y cizallamiento de 4 y 15 MPa respectivamente)).

Figura 7. Propiedades de algunos tipos de FRP.

Componentes del Sistema de Platinas CFRP				
Sika® CarboDur® Platinas CFRP	Módulo elástico	Tipo S 165 000 N/mm ²	Tipo M 210 000 N/mm ²	Tipo UH 400 000 N/mm ²
	Resistencia a tensión	2800 N/mm ²	2800 N/mm ²	1800 N/mm ²
Sistema de Preesforzado Sika®	Preesforzado de platinas Sika® CarboDur® a más de 200 kN (20 ton) con los sistemas de preesfuerzo Sika® CarboStress o Sika® LEOBA CarboDur®			
Sika® CarboHeater Equipo de calentamiento	Rápida aplicación (2 – 3 horas) de platinas Sika® CarboDur®			
Sika® CarboShear® L Platinas CFRP en forma de L	Carga mín. tensión	126 kN/40 mm ancho		
	Módulo de elasticidad	120 000 N/mm ²		
Sikadur® Adhesivos y morteros epóxicos	Temperatura de aplicación	Sikadur®-30 10 – 35 °C	Sikadur®-30 LP 25 – 55 °C	Sikadur®-41 10 – 35 °C
	Módulo de elasticidad	12 800 N/mm ²	10 000 N/mm ²	9000 N/mm ²
	Resistencia de adherencia	> 4 N/mm ² (falla del concreto)	> 4 N/mm ² (falla del concreto)	> 4 N/mm ² (falla del concreto)
	Uso	Pega de platina	Pega de platina	Mortero de reparación
Componentes del Sistema de Telas FRP				
SikaWrap® Telas FRP	Varios tipos de telas SikaWrap® están disponibles para satisfacer los requerimientos del especificador y del contratista. Disponibles telas unidireccionales tejidas y no tejidas hechas de fibra de vidrio, aramida y carbono. También pueden ofrecerse telas bidireccionales con fibras de carbono y vidrio. El rango de peso está entre 200 y 600 g/m ² para carbono, 400 a 1000 g/m ² para vidrio y 300 a 600 g/m ² para aramida. Mas posibilidades y combinaciones de fibra están disponibles.			
Sikadur® Resinas de impregnación epóxicas	Todas las telas SikaWrap® pueden ser impregnadas con las resinas de impregnación Sikadur® ensayadas con el sistema y todas son apropiadas para los tipos de sustratos más comunes.			

Fuente: (SIKA, 2007).

ANEXO C - BASES TEÓRICAS REFERENTES A LOS MODELOS EXPERIMENTALES

Definición y Alcances

Un modelo experimental, es el conjunto de elementos físicos, a los cuales se les quiere evaluar su comportamiento o sus propiedades físicas, mecánicas, químicas, eléctricas u otra en específico, mediante una prueba real desarrollada en campo o en laboratorio (ensayo), es decir, es el desarrollo práctico de una teoría anteriormente comprobada o no sobre un prototipo de elementos físicos. Para el desarrollo de un modelo y una prueba experimental se debe contar con materiales y equipos adecuado según el modelo a realizar, los estudios previos y el conocimiento de la temática juegan un papel importante en la utilización y no desperdicio de materiales, así como del uso adecuado y certero de la maquinaria en cuestión, todo para lograr un modelo adecuado (que cumpla con los requisitos físicos planteados) y una prueba satisfactoria.

En ingeniería, la mayoría de pruebas experimentales se realizan sobre elementos a los cuales se le quiere conocer o comprobar su comportamiento mecánico. Para la realización de un modelo experimental, se requiere un completo conocimiento de los materiales implicados, así como de la geometría del problema y los parámetros que se quieren estudiar. Pero a diferencia de la teoría y la matemática, las simulaciones prácticas son costosas, perdurables, imperfectas y hasta complejas de realizar para un solo hombre, por lo cual se necesita gran inversión económica y humana para realizarse. “Los modelos experimentales deben hacerse con un gran número de pruebas, ya que la dispersión de resultados puede variar con cualquier pequeño detalle que cambie de una prueba a otra” (VIVIESCAS, 2009). Es recomendable que para la realización de cualquier simulación experimental, se goce de un amplio conocimiento teórico de la temática física a desarrollar, para no desgastar ni desperdiciar ningún recurso, además se

tenga conocimiento del lugar de prueba, las herramientas a utilizar y de las necesidades físicas que esta requiere, teniendo en cuenta que hay igual porcentaje de concluir en resultados negativos y positivos.

ANEXO D – BASES TEÓRICAS REFERENTES A LOS MODELOS NUMÉRICOS

Definición y Alcances

Es una técnica basada en el cálculo numérico, utilizada en la ingeniería para validar, refutar o describir de la forma más precisa modelos conceptuales propuestos (simplificaciones, aproximaciones o hipótesis) a partir de observaciones o resultados de teorías anteriores. Recientemente la modelación numérica ha tenido un avance importante en manera de rapidez y funcionalidad con el desarrollo de programas computacionales “Software” especializados en la simulación de fenómenos físicos e ingenieriles, estos programas están basados igualmente en el desarrollo de ecuaciones matemáticas facilitándole al usuario la obtención de resultados sin gasto en cálculos numéricos y con la opción de ingresar solo los parámetros más importantes para solucionar un problema en específico. Una de las técnicas más usadas en la solución de problemas de ingeniería que implique modelos físicos mediante estos programas de computador, es la técnica de Elementos Finitos.

La técnica de análisis por elementos finitos (AEF) consiste en el empleo de métodos numéricos en la resolución de un problema físico determinado. Esta técnica se basa en dividir la geometría de un problema físico en pequeños elementos geométricos, donde existe la facilidad de resolver unas ecuaciones diferenciales correspondientes a su análisis. La resolución de estas ecuaciones de forma discreta se realiza de forma iterativa hasta que se alcanza convergencia en la solución. La solución numérica se hace teniendo en cuenta los materiales empleados, los elementos de vecindad, las condiciones de contorno y las fuentes externas y se interpretan según los resultados según los parámetros de comportamiento que se hayan requerido. En efecto, en la actualidad los cálculos del análisis elementos finitos se realizan mediante programas computacionales, los “software” que permiten realizar este proceso de forma eficiente y cómoda se

denominan “herramientas de análisis por elementos finitos”, o simplemente “herramientas de elementos finitos (HEF)”. Un ejemplo de estas herramientas son los programas computacionales Ansys, SolidWorks, Nastran, Patran, Abaqus, Comsol, entre otros.

También, para el desarrollo de un buen modelo numérico no solo se debe tener conocimiento teórico del problema, sino previamente también un buen estudio de materiales y una comprobación experimental adecuada (todo modelo numérico, así sea simple, debe ser calibrado con uno experimental.). “Para interpretar resultados, se necesita grandes conocimientos estructurales, alta capacidad de procesamiento de los computadores y costosos modelos experimentales ya hechos. Los modelos numéricos, bien calibrados y validados, ahorran tiempo y materiales, el problema de ellos es que no hay suficientes datos experimentales que lo validen” (VIVIESCAS, 2009).

Clasificación

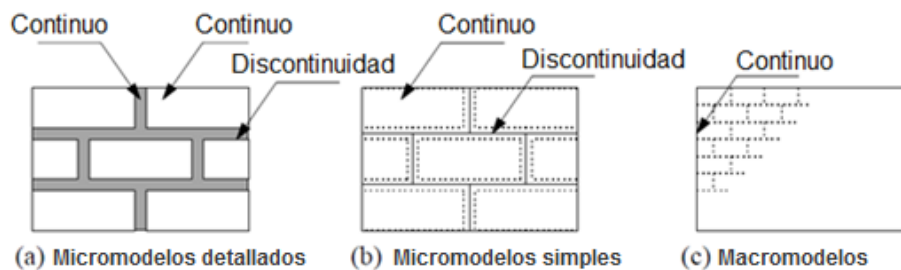
Para la realización de un modelo numérico, se debe conocer que elementos se quieren evaluar, es decir, se requiere hacer un análisis global o local del problema. Para ello existen tres tipos de técnicas principales de modelamiento numérico: los micromodelos detallados, los micromodelos simples y los macromodelos (*Figura 8*). “En los modelos micro se discretiza (modelar individualmente) elemento por elemento (en los detallados mejor que en los simples) y en los Macro se modela todo el problema como un solo elemento” (LEAFER y HONG, 2008). Ninguna de estas técnicas de modelamiento puede ser mejor que otra, porque cada uno permite el análisis de algo diferente y/o de un parámetro específico del problema (Independiente del tipo de estrategia usada para modelar, la exactitud de estos modelos solo es posible si se cuenta con una completa descripción de los materiales) (LOURENÇO, 1998; VIVIESCAS, 2009).

En los micromodelos detallados se modelan el mayor número de partes que componen la estructura analizada, los elementos son continuos o discontinuos, es decir, los sólidos son continuidades pero las uniones entre ellos discontinuidades. Los micromodelos son buenos para entender el comportamiento local de las unidades que componen un todo y son adecuados para problemas de geometrías pequeñas.

En los micromodelos simples se modelan los elementos más grandes como continuos y los más pequeños y la unión entre los grandes como discontinuos. Estos no tienen en cuenta las propiedades de algunos de los materiales constituyentes por considerarlos poco influyentes en el comportamiento global y local del problema. En los micromodelos simplificados se disminuye la complejidad de la estructura y de las posibles soluciones numéricas.

Por último, los macromodelos consideran a todos los elementos como continuos, es decir, que no tiene en cuenta los efectos locales del problema, sino los efectos de la geometría global de la situación analizada. Estos solo se aplican cuando las dimensiones a modelar son grandes, ya que fueron creados para analizar estructuras en menor detalle y complejidad. Es más rápido y sencillo de implementarse, pero puede dejar muchos parámetros importantes por fuera de la solución del problema, por lo cual, se debe ser muy cuidadoso al usarlos.

Figura 8. Esquemas de los tipos de modelos numéricos.



Fuente: Modificado de (LOURENÇO, 1998).