

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

DEFINICIÓN DE UNA EXPRESIÓN MATEMÁTICA QUE PERMITA EVALUAR EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO EL TRASLAPO MÍNIMO DE LAS BARRAS GFRP UTILIZADAS COMO REFUERZO INTERNO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA ANTE CARGAS FUERA DEL PLANO

DANIEL SEBASTIAN CORCHO RAMIREZ

BOGOTÁ, D.C. 03 DE OCTUBRE DE 2022



UNIVERSIDAD

**DEFINICIÓN DE UNA EXPRESIÓN MATEMÁTICA QUE PERMITA EVALUAR EN
FUNCIÓN DEL DIÁMETRO EL TRASLAPO MÍNIMO DE LAS BARRAS GFRP
UTILIZADAS COMO REFUERZO INTERNO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA ANTE
CARGAS FUERA DEL PLANO**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERIA
CIVIL, CON ENFASIS EN ESTRUCTURAS**

**NANCY TORRES CASTELLANOS, PhD
DIRECTORA**

BOGOTÁ, D.C. 27 DE SEPTIEMBRE DE 2022



El proyecto de grado de maestría titulada “Definición de una Expresión Matemática que Permita Evaluar en Función del Diámetro el Traslapo Mínimo de las Barras GFRP Utilizadas Como Refuerzo Interno de Muros de Mampostería Ante Cargas Fuera del Plano”, presentada por Daniel Sebastian Corcho Ramírez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

Nancy Torres Castellanos, PhD.
Directora del Proyecto de Grado

Jaime Garzón Erasmo Garzón Moreno
Jurado

Carlos Eugenio Palomino Arias
Jurado

Resumen

Una de las principales necesidades de la sociedad es contar con una vivienda propia que les brinde seguridad y confort; teniendo en cuenta esto, el sector de la construcción, para el año 2021, ha alcanzado una cifra sin precedentes en cuanto a la venta de viviendas nuevas en Colombia, cerca de 239 mil viviendas fueron comercializadas el año anterior.

Los sistemas estructurales que predominan en este importante auge del crecimiento de la construcción, son los sistemas industrializados de muros de concreto y las edificaciones de muros portantes en mampostería estructural, en los que, mediante la utilización de unidades de mampostería, de concreto o arcilla, unidos por un mortero de pega, se construyen los elementos encargados de soportar tanto las fuerzas verticales, como las fuerzas dinámicas a las cuales se puede ver sometida la estructura. Teniendo en cuenta las características geométricas de las unidades de mampostería utilizadas, es posible disponer barras de refuerzo dentro de sus celdas, los cuales se vinculan al comportamiento del muro, mediante la utilización de un mortero fluido.

Como es bien sabido, las barras que convencionalmente se utilizan para el refuerzo de las edificaciones de muros portantes, es el acero estructural. Su capacidad de ductilidad y su perfecta articulación con el mortero fluido permiten garantizar un trabajo en conjunto de los elementos estructurales dispuestos para soportar las cargas externas. Sin embargo, la corrosión del acero de refuerzo es uno de los factores que más llegan a afectar la estabilidad de la estructura, debido a la pérdida de adherencia entre la barra de refuerzo y el mortero hidráulico circundante disminuyendo la capacidad estructural del elemento.

En vista de la afectación que puede llegar a tener la corrosión en la estabilidad de una estructura, desde hace más de 3 décadas se han desarrollado diferentes programas de investigación en elementos de concreto utilizando barras compuestas de polímeros reforzados con fibras – Fiber Reinforced Polymers, (FRP, por sus siglas en inglés) –como refuerzo interno del elemento en reemplazo del acero tradicional. Algunas de sus propiedades mecánicas más atractivas para implementarlas en la construcción son: alta resistencia a la tensión, alta resistencia a la corrosión y no tiene conductividad.

En países como Estados Unidos, Canadá y China se han implementado en sus normas de diseño la utilización de barras de FRP como refuerzo interno en elementos de concreto y en el mes de septiembre del presente año se publicó el documento ACI CODE-440.11-22: Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary que presenta los requisitos de diseño de elementos de concreto reforzado internamente con barras de FRP.

Por otra parte, las investigaciones en cuanto al uso de este material de refuerzo en elementos de mampostería no han sido muy extensa. Debido a esto, en las normas de diseño aún no se definen los requisitos mínimos a tener en cuenta a la hora del diseño estructural de muros reforzados internamente con barras de Glass Fibers Reinforced Polymers (GFRP, por sus siglas en inglés). Solo hasta el pasado mes de junio del presente año, fue incluido un apéndice que contempla el uso de las barras de GFRP como refuerzo interno de la mampostería en la nueva versión del TMS-402 TMS 402/602-22 Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures.

En la Escuela Colombiana de Ingeniería, ya se han llevado a cabo algunas investigaciones relacionadas con el estudio del comportamiento mecánico de muros de mampostería sometidas a cargas fuera del plano, tanto de concreto como de arcilla, reforzados internamente con barras continuas de FRP que han servido de base para complementar el apéndice del TMS 402/602-22.

Dando continuidad a los estudios realizados en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, relacionados con el comportamiento de la mampostería reforzada internamente con barras de FRP, el presente proyecto de investigación consistió en la ampliación de una primera fase experimental, en la cual se evaluó el comportamiento mecánico de muros de mampostería de concreto reforzados internamente con barras de GFRP sometidos a cargas fuera del plano. Algunas de las variables que se evaluaron del comportamiento de estos fue: resistencia a la flexión del muro, considerando diferentes diámetros de la barra, ubicación de la barra de refuerzo dentro de la celda y la longitud de traslapo.

Para el análisis del comportamiento estructural de los muros, se contó con 21 muros en total, reforzados con barras de GFRP #4, #5 y #6. Algunas de las barras dentro de las celdas se encontraban traslapadas, esta longitud de traslapo fue definida en función de las ecuaciones establecidas en el documento del ACI 440-1R-15, en el cual se establecen los requisitos mínimos para el análisis y diseño de estructuras de

concreto reforzadas con barras de FRP. La capacidad a flexión fuera del plano de estos muros reforzados con barras traslapadas, fueron comparados con la capacidad de los muros control, los cuales estaban reforzados con el mismo diámetro de barras de GFRP, pero estas eran continuas. Todos los especímenes tenían una altura total de 2.20 metros, espesor de 0.19 metros y longitud horizontal variable.

Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos de cada uno de los especímenes de ensayo, se observó un comportamiento elástico hasta la falla para todos los muros. El comportamiento mecánico de las barras de refuerzo de GFRP permitió la recuperación, de aproximadamente el 73% de la deflexión máxima generada por la acción de cargas por fuera del plano.

Por otra parte, los muros reforzados con barras traslapadas presentaron menores deflexiones en la mitad de la altura con respecto a los muros control, reforzados con barras continuas. Esto se atribuye al aumento en la rigidez del muro, debido a la presencia de las barras de refuerzo traslapadas en la zona central del muro. En promedio, para todos los muros ensayados, se tuvo una reducción de aproximadamente un 35% de la deflexión máxima desarrollada en los muros control.

Finalmente, se desarrolló un modelo matemático para evaluar en función del diámetro, la longitud de traslapo mínima de las barras de GFRP utilizadas como refuerzo interno de muros de mampostería de concreto. Con este modelo matemático planteado, la longitud de traslapo para muros de mampostería puede ser aproximadamente el 70% de la longitud evaluada inicialmente con la ecuación establecida en el documento del ACI 440.1R-15 para el diseño de elementos de concreto reforzados con barras de FRP.

Índice general

Resumen	4
Índice de ecuaciones	9
Índice de figuras	10
Índice de fotografías	11
Índice de gráficas.....	12
Índice de tablas.....	13
1. Introducción	14
2. Marco de referencia.....	18
2.1. Características de los materiales utilizados	19
2.1.1. Unidad de mampostería	19
2.1.2. Mortero de pega	19
2.1.3. Mortero de relleno	20
2.1.4. Refuerzo de FRP	20
2.2. Consideraciones de diseño.....	23
3. Estado del arte	31
4. Objetivos.....	48
4.1. Objetivo general:	48
4.2. Objetivos específicos:.....	48
5. Programa experimental.....	49
5.1. Características de los materiales utilizados en la construcción de los especímenes de ensayo	51
5.1.1. Mortero de pega	51
5.1.2. Mortero de relleno	51
5.1.3. Mampostería de concreto	52
5.2. Proceso constructivo	52
5.3. Montaje de ensayo	55
5.4. Instrumentación externa	56
6. Calculo teórico de la capacidad de los muros	59
6.1. Protocolo de carga.....	64
7. Resultados y análisis	65
7.1. Modos de falla	65
7.2. Determinación del modelo matemático para predecir la longitud de desarrollo de barras GFRP	72

7.3. Comparación del modelo matemático planteado con las ecuaciones establecidas en las guías de diseño	77
7.4. Deformación permanente de los especímenes de ensayo.....	80
7.5. Comportamiento mecánico de los muros de mampostería de concreto	81
7.6. Evaluación de la influencia del traslapo en el comportamiento mecánico de los muros de mampostería de concreto	84
8. Conclusiones y recomendaciones	87
9. Bibliografía.....	89

Índice de ecuaciones

gráficantía balanceada.....	24
Ecuación 2. Momento nominal de la sección	25
Ecuación 3. Profundidad del bloque de compresiones.....	26
Ecuación 4. Profundidad del eje neutro desde la fibra más extrema en compresión.....	26
Ecuación 5. Esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo.....	26
Ecuación 6. Longitud de desarrollo de acuerdo con el ACI 440.1R-15.....	28
Ecuación 7. Longitud de desarrollo de acuerdo con el CSA S806-12	29
Ecuación 8. Modelo matemático para establecer la longitud de desarrollo en elementos UHPC. (Michaud et al., 2021)	38
Ecuación 9. Longitud de desarrollo para barras de FRP. (Basaran & Kalkan, 2020).....	40
Ecuación 10. Tensión mínima requerida en las barras de acero utilizadas como refuerzo de muros de mampostería. (Kelln, 2014)	42
Ecuación 11. Equilibrio de fuerzas en una barra de refuerzo	72
Ecuación 12. Esfuerzo de adherencia normalizada ACI 440.1R-15	73
Ecuación 13. Regresión lineal múltiple para evaluar esfuerzo de adherencia	75
Ecuación 14. Modelo matemático experimental para determinar el esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo de FRP traslapadas en muros de mampostería.....	76
Ecuación 15. Expresión matemática que permite evaluar el traslapo mínimo de las barras de GFRP en muros de mampostería de concreto ante cargas fuera del plano.	77
Ecuación 16. Longitud de desarrollo de barras de acero embebidas en mortero de relleno.	79
Ecuación 17. Deformación permanente de muros sometidos a carga fuera del plano	81
Ecuación 18. Modelo matemático para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería sometida a cargas por fuera del plano.....	84

Índice de figuras

Figura 1. Modos de falla de falla. Fuente: ACI 440.1R-15.....	25
Figura 2. Diagrama de flujo para la determinación del momento nominal de la sección de análisis.....	27
Figura 3. Detalle de las vigas instrumentadas (Eltantawi et al., 2022).....	33
Figura 4. Esquema del espécimen de ensayo (las dimensiones están en mm). (Michaud et al., 2021).....	37
Figura 5. Configuración experimental. (Basaran & Kalkan, 2020)	40
Figura 6. Dimensiones de las unidades de mampostería de concreto	52
Figura 7. Despiece general de la viga de apoyo.	52
Figura 8, Montaje de ensayo.....	55
Figura 9. Instrumentación externa.....	57
Figura 10. Transferencia de esfuerzo para las barras de refuerzo (Nanni et al., 2014)	72

Índice de fotografías

Foto 1. Centralizadores utilizados durante el proceso constructivo	53
Foto 2. Proceso constructivo. (a) Verificación de longitudes de traslapo experimentales (b) Verificación de la posición de las barras de refuerzo durante el proceso constructivo (c) Llenado de celdas.....	54
Foto 3. Montaje de ensayo. (a) Vista lateral (b) Vista frontal	56
Foto 4. Instrumentación externa.	57
Foto 5. LVDT ubicado en el apoyo superior para medir desplazamientos del perfil de apoyo.....	65
Foto 6. Patrones de falla. (a) Fisuras paralelas entre las unidades de mampostería y el mortero de pega. (b) Aumento de la separación de las unidades de mampostería y mortero de pega. (c) Falla por aplastamiento zona de compresión.....	66
Foto 7. Falla explosiva del muro 5-2500-C-T-1.23B.....	67
Foto 8. Posición de la barra de refuerzo dentro de la celda.	68

Índice de gráficas

Gráfica 1. Curva Esfuerzo vs. Deformación Unitaria de las barras de GFRP y de Acero. (Buitrago, 2020)	22
Gráfica 2. Carga vs. Deflexión típica de los muros de mampostería de concreto reforzada con FRP. (Otálora, 2017)	45
Gráfica 3. Relación entre capacidad teórica y experimental del programa experimental..	70
Gráfica 4. Relación entre capacidad teórica reducida y capacidad experimental del programa experimental.	71
Gráfica 5. Deformación permanente de los muros	80
Gráfica 6. Curva de momento vs. Desplazamiento al centro de luz del muro 4-1500-C-C81	
Gráfica 7. Módulo de elasticidad experimental – $f'_m = 10.4$ MPa.	82
Gráfica 8. Módulo de elasticidad experimental – $f'_m = 17.3$ MPa.	83
Gráfica 9. Envolvente momento vs desplazamiento al centro de la luz – Muro 4-1500-C	84

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de la ecuación predictiva ajustada con los requerimientos en las normas vigentes (Kelln, 2014)	42
Tabla 2. Resumen de los muros que hacen parte del programa experimental	50
Tabla 3. Resumen de la capacidad teórica de los muros	63
Tabla 4. Resumen de la longitud de desarrollo	64
Tabla 5. Resumen experimental	69
Tabla 6. Variables para determinar la longitud mínima de traslapo	75
Tabla 7. Estadísticas de la regresión.	75
Tabla 8. Validación de la pertinencia de la ecuación planteada.	77
Tabla 9. Cuadro comparativo del modelo matemático propuesto y las ecuaciones establecidas en las guías de diseño.	78
Tabla 10. Comparativo del modelo matemático propuesto y la ecuación del documento de la NSR-10	79
Tabla 11. Comparación entre capacidad del muro control y los muros con el refuerzo traslapado.....	85

1. Introducción

Una de las necesidades básicas de la comunidad ha sido tener su propia vivienda, y en Colombia, se ha venido trabajando en proyectos de gran altura para brindar espacios adecuados a la gran cantidad de personas que llegan a las principales ciudades. Los sistemas estructurales que ha tenido un importante auge en la última década son los muros portantes, tanto de concreto como de mampostería, que, teniendo en cuenta aspectos económicos (Al-Jabari et al., 2015), la hacen la alternativa más atractiva para vivienda sobre otros sistemas de construcción.

La mampostería estructural consiste en piezas huecas, de concreto o arcilla, que pueden estar rellenas completa o parcialmente con mortero fluido (grout) y unidas por medio de un mortero de pega. Estos elementos estructurales necesitan ser reforzados con otros materiales que fortalezcan su comportamiento ante esfuerzos que no son capaces de resistir; así como sucede con el concreto reforzado, la mampostería presenta un comportamiento débil ante esfuerzos de tensión y debido a esto debe ser reforzada, generalmente con acero estructural, para que trabajen conjuntamente y presenten un comportamiento idóneo ante cargas de servicio.

Las barras de acero es el material de refuerzo interno más común en las estructuras, por su alta resistencia ante esfuerzos de tensión y su compatibilidad con el concreto, lo cual ha sido investigado desde ya hace mucho tiempo. A partir de todas las investigaciones que se han realizado sobre el comportamiento del acero de refuerzo, el concreto y el comportamiento en conjunto de estos ante los diferentes tipos de solicitaciones a los cuales pueden estar sometidos en una estructura, es que se ha podido establecer una serie de reglas y parámetros consolidados en las normas y requisitos de construcción, que en Colombia se encuentran consignados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR – 10.

Uno de los grandes problemas que pone en riesgo la estabilidad y el correcto comportamiento de las estructuras reforzadas con acero, es la corrosión del acero; bien sea por cloruros presentes en el medio ambiente o por la carbonatación del concreto que puede afectar las propiedades del acero y la degradación del concreto.

En un artículo publicado en la revista de la sociedad americana de ingenieros civiles (Wilcox, 2017), ASCE (por sus siglas en ingles), se afirma que la corrosión en el acero afecta gravemente la capacidad de resistir cargas de una estructura. Para un caso práctico de rehabilitación de un puente vehicular soportado sobre pilas de acero

en West Virginia, se determinó que la resistencia del puente se redujo al 40% de su capacidad de diseño debido a la corrosión del acero en apenas 44 años de la puesta en funcionamiento de la estructura.

Así mismo, en una investigación desarrollada en la ciudad de Barranquilla (Caez, 2004), la cual se centró en evaluar la caracterización y patologías de edificaciones en mampostería, se evidencia que las estructuras de la ciudad se encuentran sometidas a condiciones climáticas extremas, que inducen en los elementos estructurales solicitaciones adicionales que no son tenidas en cuenta a la hora del diseño, producto de la contracción en las unidades de concreto o la expansión en las unidades de arcilla. En muchas ocasiones puede que la aparición de estas fisuras no represente una afectación importante en la estabilidad de la estructura; sin embargo, estas aumentan la permeabilidad del elemento y facilita el acceso de agentes externos que pueden llegar a generar corrosión en el acero de refuerzo. La pérdida de adherencia entre el refuerzo y el material cementante circundante genera una disminución en la capacidad de transferencia de esfuerzos y una reducción importante en la capacidad de carga de estos elementos.

La corrosión desarrollada en el acero conlleva a un aumento en los costos por mantenimiento de las estructuras, ya que, se hace necesaria en muchas ocasiones la demolición y la respectiva reconstrucción de aquellos elementos que ya no sean capaces de soportar las cargas para las cuales fueron diseñados.

A través de los años, se ha tenido un gran avance tecnológico en general, lo que le ha permitido a la ciencia tener investigaciones mucho más ambiciosas buscando introducir en el análisis y diseño otro tipo de materiales a los utilizados convencionalmente en la construcción. Uno de los materiales alternativos para el refuerzo de estructuras de concreto son las barras de FRP (Fiber Reinforcement Polymers, por sus siglas en inglés), que por sus propiedades tales como, alta capacidad para resistir cargas en dirección a la colocación de las fibras, baja densidad, comportamiento elástico hasta la falla, no corrosivo y transparencia electromagnética, lo constituye como un material idóneo para trabajar en conjunto con el concreto (Nanni et al., 2014). Gracias a todas las investigaciones relacionadas con este material es que, países como Japón, Canadá y Estados Unidos, tienen en cuenta en sus normas y guías de diseño este material como una alternativa para el reforzamiento interno de estructuras de concreto. El Instituto Americano de Concreto (ACI – American Concrete Institute, por sus siglas en inglés), creó el comité ACI-440, en el cual sus miembros

consolidan, a través de diferentes investigaciones, los requerimientos que deben ser considerados en el diseño de elementos de concreto reforzado con barras de FRP y en el presente año publicó el código ACI CODE-440.11-22: Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary que presenta los requisitos de diseño de elementos de concreto reforzado internamente con barras de FRP..

Las barras de FRP son elementos obtenidos en un proceso de producción denominado pultrusión. Estas se componen de una serie de fibras embebidas en una matriz. Estas fibras son las encargadas de las propiedades mecánicas mientras que la matriz está directamente relacionada con la durabilidad de las barras. Estas fibras pueden ser de vidrio, carbono, aramida o basalto; las barras reforzadas con fibras de vidrio presentan una mayor relación de costo beneficio.

Además, otro de los beneficios que trae la utilización de este tipo de barras de refuerzo es su baja densidad (Nanni et al., 2014), ya que, los materiales GFRP son ligeros, permitiendo así equipos de construcción más pequeños durante el armado del refuerzo y equipos más livianos para manejarlos, así como la reducción de costos asociados al transporte y sus implicaciones ambientales, ya que el peso específico de estos materiales viene siendo apenas el 45% respecto al acero.

Las investigaciones relacionadas con el comportamiento estructural de estos materiales trabajando en conjunto con el concreto, ha permitido definir una serie de requisitos mínimos a la hora del diseño. Sin embargo, en el caso de la mampostería, hasta el mes de junio del presente año, se incluyó un apéndice que contempla el uso de las barras de FRP como refuerzo interno de la mampostería en la nueva versión del TMS-402 TMS 402/602-22 Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures. Para este apéndice se brindó un aporte por las investigaciones desarrolladas en la Escuela Colombiana de Ingeniería (Otálora, 2017; Quintana Ruiz, 2017; Urbina Gomez, 2020), respecto al desempeño de muros de mampostería de concreto reforzados internamente con barras de GFRP. En estas investigaciones también se evidenció que, debido al comportamiento elástico hasta la falla que presentan estas barras, se tendrían menores costos de mantenimiento en aquellos elementos que se vean sometidos a cargas que generen estados límites, ya que, las deformaciones en estas barras son recuperables, y de esta manera, sería posible reparar únicamente los elementos que posterior a la carga no cumplan con las capacidades de diseño. Esto no es posible con los elementos de mampostería

reforzados con acero, ya que, este presenta un comportamiento elasto-plástico generando deformaciones permanentes imposibilitando la facilidad en su reparación.

Finalmente, teniendo en cuenta reglamentos internacionales, como el comité del ACI 440, se han desarrollado otras investigaciones, en las cuales, se han tenido grandes avances en el conocimiento del comportamiento de estas barras utilizadas como reforzamiento interno en muros de mampostería; que han servido de base para el apéndice ya mencionado relacionado con el diseño y comportamiento de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP en el código americano de diseño de mampostería The Masonry Society, en su versión del año 2022. En el medio Colombiano, sin embargo, aún no se cuentan con requisitos sobre el uso de este material como refuerzo interno de elementos de concreto y de mampostería.

Es de resaltar que en diferentes zonas costeras de Estados Unidos y Centroamérica, en los últimos años se han llevado a cabo la construcción de viviendas de mampostería reforzadas internamente con barras de FRP; por lo tanto, para complementar los estudios ya realizados en la Escuela Colombiana de Ingeniería, donde se plantearon ecuaciones para evaluar la capacidad teórica a flexión ante cargas fuera del plano de muros reforzados con barras de FRP, en los cuales se realizaron amplios programas experimentales que permiten validar los cálculos teóricos, se definió un programa experimental que permitiera definir una ecuación para evaluar la longitud de desarrollo mínima de barras de refuerzo de FRP, teniendo en cuenta las características inherentes de los materiales, evitando así una falla por adherencia entre la barra de refuerzo y el material cementante circundante.

2. Marco de referencia

Como ya se mencionó, el comportamiento en conjunto de los elementos de concreto reforzados internamente con barras de FRP, ya ha sido estudiado a profundidad, lo cual, ha permitido que se establezcan una serie de normas de diseño en países como Estados Unidos, Canadá o Japón. Sin embargo, hasta hace poco se ha presentado un desarrollo científico importante, centrado en evaluar el comportamiento de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP; y de esta manera contribuir a su reglamentación en las principales normas de diseño.

A pesar de la ausencia de guías de diseño hasta hace poco, relacionadas con la evaluación del comportamiento estructural de mampostería reforzada con barras de FRP, las investigaciones relacionadas en el tema se han enfocado en evaluar la capacidad teórica de estos elementos en función de las ecuaciones establecidas para concreto reforzado.

Dentro de los reportes de investigaciones relacionados con la mampostería, se ha enfatizado en la importancia de evaluar las propiedades mecánicas de los elementos que componen el programa experimental. Cabe resaltar que, teniendo en cuenta el comportamiento anisotrópico de estos elementos, es necesario llevar a cabo un control de calidad, no solamente de los materiales individuales (unidad de mampostería, mortero de pega, mortero de relleno, barras de refuerzo) sino también, del comportamiento en conjunto de estos (muretes).

A continuación, se presentan las principales propiedades mecánicas utilizadas para caracterizar cada uno de los componentes en la construcción de muros de mampostería. Además, se enuncian las normas técnicas de ensayo establecidas en Colombia en las que se definen los procedimientos para la ejecución de estos ensayos de laboratorio:

2.1. Características de los materiales utilizados

2.1.1. Unidad de mampostería

Las unidades de mampostería pueden clasificarse bajo 3 aspectos: material, disposición de las perforaciones y su uso estructural (Molano Camargo & Torres Castellanos, 2017).

Las unidades de perforación vertical se pueden utilizar en construcciones de mampostería estructural, ya que, de acuerdo con su geometría, permite la disposición de barras de refuerzo que le permitan aumentar su capacidad de soportar diferentes tipos de solicitaciones cuando estos hacen parte del sistema principal de resistencia sísmica.

Las unidades de mampostería de concreto son unidades prefabricadas, en el que se lleva a cabo un proceso riguroso de selección de agregados y curado controlado, para garantizar la calidad y propiedades mecánicas de este.

La clasificación y requerimientos mínimos de capacidad y dimensiones de las unidades de mampostería de concreto se establecen en la NTC 4026.

2.1.2. Mortero de pega

El mortero, que, por sus características de adherencia, permite unir las unidades de mampostería para conformar los muros dentro de una estructura. Este, está compuesto por una mezcla de pasta (cemento + agua) y agregado fino, y en algunos casos puede contener algunos aditivos. Para garantizar un comportamiento adecuado en conjunto con las unidades de mampostería, este debe cumplir con ciertos criterios de fluidez y resistencia. Es importante llevar a cabo una evaluación previa de la capacidad de absorción de las unidades de mampostería que componen los muros, para evitar la pérdida de agua necesaria para garantizar el desarrollo de las propiedades mecánicas de este mortero.

De acuerdo con la NSR-10, los morteros de pega pueden clasificarse como H, M, N o S, en función de su resistencia mínima a la compresión. Además, es necesario que estos cumplan con ciertos criterios de fluidez dependiendo de su clasificación, para así, garantizar y facilitar la extensión del material al realizar los procesos constructivos.

Los morteros utilizados en la construcción deben cumplir con los requisitos mínimos establecidos en la NTC 3329.

2.1.3. Mortero de relleno

El mortero de relleno es una mezcla fluida de cemento y agregados, utilizado para llenar por completo las celdas de las unidades de mampostería. Dentro de estas celdas es posible disponer una serie de barras de refuerzo, definido por requisitos de capacidad. Este mortero debe tener la capacidad de adherir todos los componentes del muro (unidades de mampostería, mortero de pega y acero de refuerzo) para que trabajen de manera monolítica.

El mortero de relleno debe cumplir con los requisitos mínimos establecidos en la NTC 4048.

2.1.4. Refuerzo de FRP

A nivel de comportamiento estructural, se requiere conocer algunas propiedades mecánicas de los materiales que componen los elementos que hacen parte del sistema de resistencia sísmica.

Los muros de mampostería, al tener un comportamiento anisotrópico, es necesario evaluar su respuesta ante diferentes tipos de sollicitaciones a los cuales se puede ver sometido dentro de una estructura. Generalmente estas sollicitaciones pueden llegar a generar esfuerzos de tensión, para los cuales los muros de mampostería no tienen un buen comportamiento. Estos esfuerzos pueden llegar a ser más críticos cuando la fuerza externa genera flexión en el elemento; por tanto, es necesario reforzarlos para que tenga la capacidad de soportar estos esfuerzos.

Las propiedades mecánicas de las barras de refuerzo de FRP han permitido el desarrollo de ensayos de laboratorio, con el objetivo, de conocer el comportamiento en conjunto con los principales materiales utilizados en la construcción. A nivel de comportamiento en conjunto con elementos de concreto, se ha observado que existe una excelente adherencia, lo cual permite una adecuada transferencia de esfuerzos entre el elemento y las barras de refuerzo.

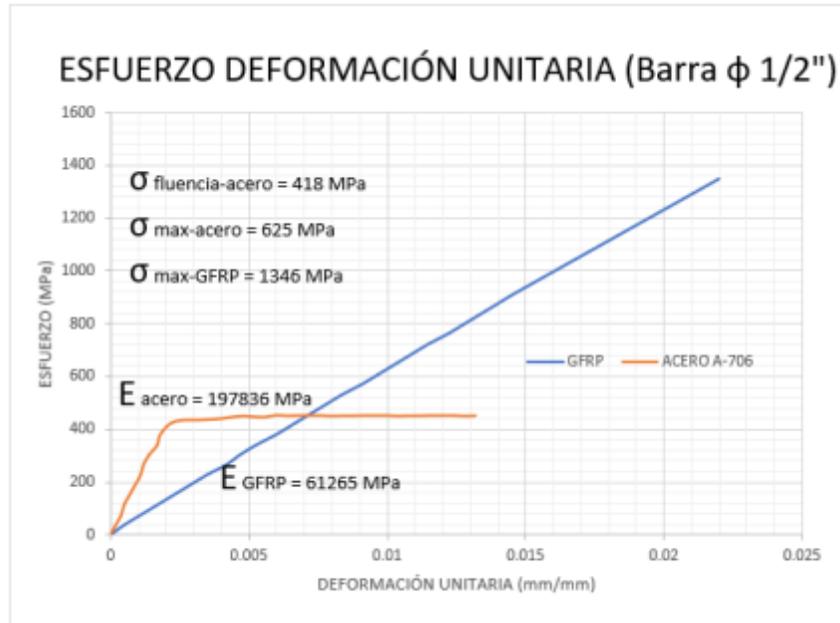
El desarrollo de proyectos experimentales permitió establecer una serie de requisitos mínimos para el análisis y diseño de elementos de concreto reforzado con barras de FRP, los cuales, se encuentran guías de diseño en países como Canadá y Estados Unidos y como ya se mencionó se normatizó para el uso como refuerzo interno de elementos de concreto y se incluyó como apéndice en el reglamento de mampostería en Estados Unidos.

Las barras de polímero reforzado con fibras también son de naturaleza anisotrópica y pueden fabricarse mediante diversas técnicas, como la pultrusión, el trenzado y el tejido. Algunos factores, como el volumen de la fibra, el tipo de fibra, el tipo de resina, la orientación de la fibra, los efectos dimensionales y el control de calidad durante la fabricación juegan un papel importante en la definición de las propiedades de una barra de FRP (Nanni et al., 2014). Los procedimientos de ensayo para definir las propiedades mecánicas de las barras de FRP se encuentran reunidas en la Norma Técnica Colombiana NTC 6280, tomada como referencia las normas ASTM.

Algunas de las características más representativas de este refuerzo son:

- Baja densidad, las barras de polímeros reforzadas con fibra tienen una densidad que oscila entre 1,25 a 2,1 g/cm³; apenas, una sexta a una cuarta parte de la densidad del acero. La reducción del peso disminuye los costos de transporte y facilita la manipulación de las barras en el lugar del proyecto.
- Alta resistencia a la tensión.
- Comportamiento elástico hasta la falla, no tiene un comportamiento dúctil.
- Transparencia electromagnética.

Uno de los comportamientos de las barras de GFRP, que cambia completamente las consideraciones de diseño de las estructuras que se encuentran en zonas de amenaza sísmica, entre intermedia y alta, es el comportamiento lineal elástico hasta la falla, sin que se presente fluencia en el material de refuerzo, por lo que su no exhibe ductilidad al contrario del comportamiento dúctil que muestran las barras de refuerzo de acero convencional, tal como se observa en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Curva Esfuerzo vs. Deformación Unitaria de las barras de GFRP y de Acero. (Buitrago, 2020)

De otro lado, realizando un comparativo entre el comportamiento mecánico de las barras de GFRP con las barras de acero convencional, se puede observar que las barras de FRP tienen una mayor capacidad de resistencia a fuerzas de tensión, aproximadamente de 3 veces comparado con el esfuerzo de fluencia del acero, sin embargo, no se observa ningún cambio en la pendiente de la relación de esfuerzo vs. deformación unitaria.

Además de establecer las propiedades mecánicas de los materiales que componen los muros de mampostería, era necesario establecer una metodología para evaluar la capacidad de carga teórica de estos especímenes reforzados con barras de FRP. A pesar que, como ya se mencionó de no contar con una reglamentación establecida para la definición de la capacidad de resistencia a carga fuera del plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP, en las investigaciones realizadas en la Escuela Colombiana de Ingeniería (Otálora, 2017; Quintana Ruiz, 2017; Urbina Gomez, 2020) se tomaron como base las ecuaciones reglamentadas para el uso de estas barras como refuerzo interno en elementos de concreto, expuestas en el ACI 440.1R-15, así como también, lo especificado para el análisis de muros de mampostería reforzados con acero convencional, expuestas en la TMS 402-16. A continuación, se presentan las consideraciones de análisis y diseño:

2.2. Consideraciones de diseño

Partiendo de lo expuesto en la guía y norma mencionadas anteriormente, se estableció la capacidad teórica de los muros reforzados con barras de FRP, tomando como base algunos parámetros de diseño relacionados con el comportamiento mecánico de estos, como lo es: la cuantía balanceada, el modo de falla en función de la relación entre la cuantía real y la cuantía balanceada, la deformación unitaria en las barras, resistencia a la compresión del murete, resistencia máxima de las barras de FRP, entre otros.

Para evaluar el comportamiento mecánico del muro sometido a cargas fuera del plano. se tienen en cuenta los siguientes supuestos de análisis:

- Existe una compatibilidad de deformación entre todos los componentes del muro (unidades de mampostería, mortero de pega, mortero de relleno y barras de refuerzo de FRP).
- La deformación unitaria del refuerzo y la mampostería son directamente proporcionales a la distancia medida desde el eje neutro.
- El comportamiento en tensión del refuerzo de FRP es linealmente elástico hasta la falla.
- Las deformaciones son pequeñas.
- La máxima deformación unitaria en la fibra más extrema sometida a compresión es de 0.0025 para unidades de mampostería de concreto.
- La resistencia a la tensión de la mampostería no se tiene en cuenta, estas fuerzas de tensión son soportadas únicamente por el refuerzo.
- La relación entre los esfuerzos de compresión en la mampostería y sus deformaciones unitarias es la siguientes:

El esfuerzo último en la mampostería es del 80% del f'_m , distribuido uniformemente sobre un bloque de compresión equivalente, definido en toda la longitud horizontal de la sección transversal, hasta una línea paralela al eje neutro, localizada a una distancia $a = 0.8 c$, medida desde la fibra más extrema en compresión.

Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación, se expresan las ecuaciones que se ajustaron para evaluar la capacidad teórica de muros reforzados con barras de FRP:

- **Cuantía Balanceada**

$$\rho_{fb} = 0.80 \beta_1 \left(\frac{f'_m}{f_{fu}} \right) \left(\frac{E_f \varepsilon_{mu}}{E_f \varepsilon_{mu} + f_{fu}} \right)$$

Ecuación 1. Cuantía balanceada

Donde:

ρ_{fb}	=	cuantía balanceada (adimensional)
β_1	=	0.80
f'_m	=	resistencia a la compresión del muro de mampostería
f_{fu}	=	esfuerzo de falla del refuerzo de FRP
E_f	=	módulo de elasticidad del refuerzo de FRP
ε_{mu}	=	deformación unitaria máxima de la mampostería

La cuantía balanceada define la cantidad de refuerzo necesaria, en relación con la sección efectiva del muro, para que se presente la falla tanto por aplastamiento en las unidades de mampostería como por la rotura de las barras de refuerzo.

- **Modo de falla**

El modo de falla esperado de cada espécimen de ensayo está en función de la relación entre la cuantía real del muro y la cuantía balanceada, cuando esta relación es mayor a 1 se espera un modo de falla ligado al aplastamiento en la zona de compresión del muro de mampostería. Por otro lado, si esta relación de cuantías es menor que 1, se espera una falla de las barras de refuerzo antes que se presente una falla por aplastamiento en las unidades de mampostería.

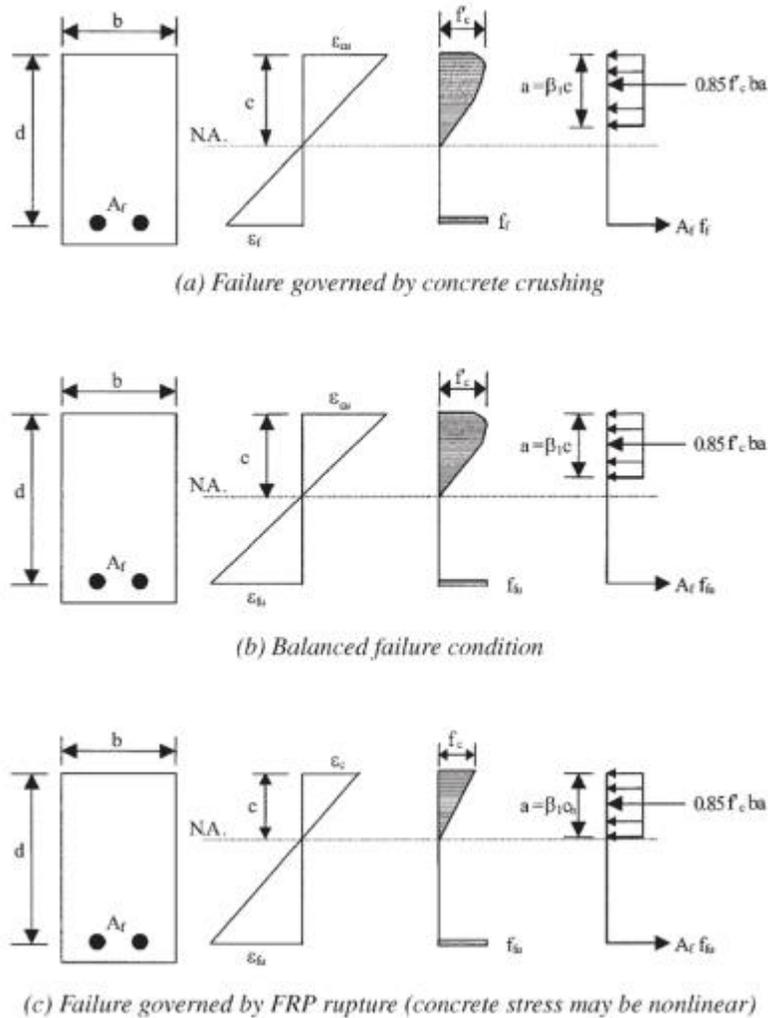


Figura 1. Modos de falla de falla. Fuente: ACI 440.1R-15

- **Momento resistente a flexión fuera del plano**

Para evaluar el momento resistente de cada espécimen se plantearon las siguientes ecuaciones (Otálora, 2017; Quintana Ruiz, 2017):

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Ecuación 2. Momento nominal de la sección

Donde:

M_n = momento nominal (N-mm)

A_f = área del refuerzo (mm^2)

- f_f = esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo (MPa)
 d = profundidad efectiva (mm)
 a = profundidad del bloque de compresiones (mm)

El momento resistente define la carga máxima teórica que puede soportar teóricamente los muros de mampostería.

$$a = \frac{A_f f_f}{\beta_1 f'_m b}$$

Ecuación 3. Profundidad del bloque de compresiones

Donde:

- b = longitud horizontal de la sección (mm)

La profundidad del bloque de compresiones está definida en función de un esfuerzo constante en toda la longitud de la sección, calculada a partir de un equilibrio de fuerzas a lo largo del eje longitudinal del elemento.

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

Ecuación 4. Profundidad del eje neutro desde la fibra más extrema en compresión

Donde:

- c = profundidad del eje neutro (mm)

La profundidad del eje neutro se define como la fibra dentro de la sección transversal que no se encuentra sometida a esfuerzos axiales debidos a la flexión.

$$f_f = E_f \varepsilon_{mu} \left(\frac{d - c}{c} \right)$$

Ecuación 5. Esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo

Para la determinación del momento resistente, se determina el esfuerzo en las barras de refuerzo de FRP, para cuando se presente la falla de cada muro; para esto, se plantea el siguiente proceso iterativo:

- a. Definir un esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo de FRP.
- b. Calcular la profundidad del bloque de compresiones definido por la Ecuación 3.
- c. Calcular la profundidad del eje neutro definido por la Ecuación 4.
- d. Calcular el esfuerzo de tensión corregido en las barras de refuerzo de FRP definido por la Ecuación 5.
- e. Comparar el valor obtenido en el paso “d” con el valor definido en el paso “a”. En caso de que los esfuerzos no sean iguales se repiten nuevamente todos los pasos, tomando como valor de entrada en cada ciclo el obtenido en el paso “d”.
- f. Calcular el momento nominal de la sección definido por la Ecuación 2

El proceso iterativo llevado a cabo se resume en el siguiente diagrama de flujo:

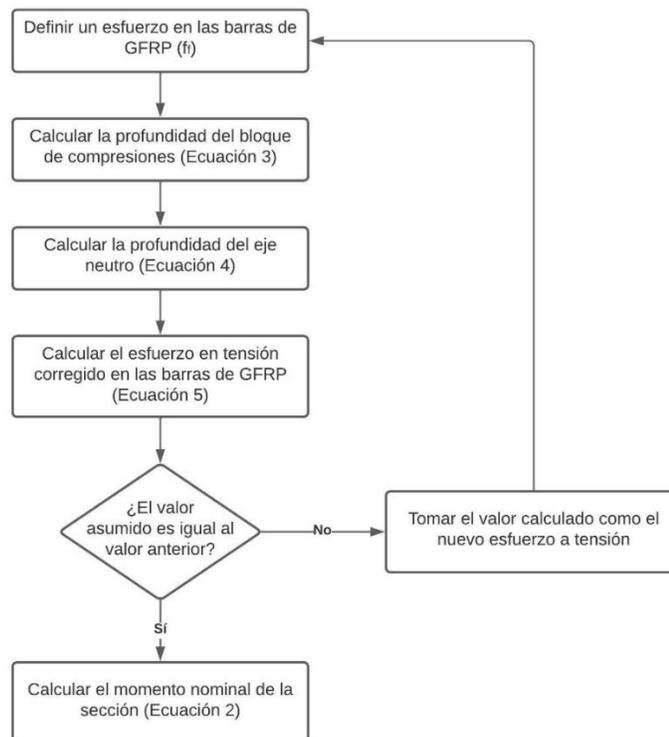


Figura 2. Diagrama de flujo para la determinación del momento nominal de la sección de análisis.

Otro aspecto importante por definir en los detalles constructivos de cualquier elemento estructural reforzado es la longitud de traslapo. La definición de la longitud mínima para garantizar una correcta transferencia de esfuerzos entre estas barras traslapadas requiere un estudio del esfuerzo de adherencia desarrollado entre el refuerzo y el material cementante circundante. La ecuación definida en el ACI 440.1R-15, para evaluar la longitud de desarrollo de las barras de FRP utilizadas como refuerzo en elementos de concreto es:

$$l_d = \frac{\psi_t \frac{f_f}{\sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b$$

Ecuación 6. Longitud de desarrollo de acuerdo con el ACI 440.1R-15

Donde:

- l_d = longitud de desarrollo (in)
- ψ = factor de ubicación de la barra (1.0 para refuerzo inferior y 1.5 para refuerzo superior)
- f'_c = resistencia a la compresión (psi)
- C = recubrimiento mínimo de la barra de refuerzo (in)
- d_b = diámetro de la barra de refuerzo (in)

Es importante resaltar que para el cálculo teórico de la longitud de desarrollo de los especímenes de ensayo del proyecto desarrollado se tuvo en cuenta la Ecuación 6, cambiando la resistencia a compresión del concreto por la resistencia a compresión del murete (f'_m).

Por otra parte, se referencian otras dos ecuaciones definidas en las guías de diseño de Canadá, que permite evaluar la longitud de desarrollo en barras de FRP utilizadas como refuerzo en elementos de concreto. Estos modelos matemáticos se utilizaron como comparativo.

De acuerdo con CSA S806-12 (guía para el diseño y construcción de edificaciones), la longitud de desarrollo de barras de FRP, se define como:

$$l_d = 1.15 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{d_{cs}} \frac{f_{FRP}}{\sqrt{f'_c}} A_{FRP}$$

Ecuación 7. Longitud de desarrollo de acuerdo con el CSA S806-12

Donde:

- A_{FRP} = área de refuerzo de FRP (mm²)
- f_{FRP} = resistencia a la tensión de la barra de FRP (MPa)
- k_1 = factor de ubicación de barra (tomado como 1.3 para refuerzo ubicado de tal manera que haya más de 300 mm de concreto debajo de la longitud de desarrollo y 1.0 para otras condiciones)
- k_2 = factor de densidad del concreto (tomado como 1.3 para concreto de baja densidad y 1.0 para concreto de densidad normal)
- k_3 = factor del tamaño del refuerzo (tomado como 0.8 para áreas total, de refuerzo menor que 300 mm² y 1.0 para más de 300 mm² de refuerzo)
- k_4 = factor del tipo de fibra (tomado como 1.0 para fibras de carbón o de vidrio y 1.25 para fibras de aramida).
- k_5 = factor de la superficie de la barra (tomado como 1.0 para superficies cubiertas de arena o trenzada, 1.05 para las superficies que son acanaladas o con un patrón en espiral y 1.8 para superficies dentadas)
- d_{cs} = distancia mínima desde la superficie de concreto más cercana y el centro de la barra (no puede exceder 2.5 d_b)
- f'_c = resistencia a la compresión (MPa) (no puede exceder 5 MPa)

Por otra parte, la guía de diseño del CSA S6-14 (guía de diseño de puentes), la longitud de desarrollo de barras de FRP, se define como:

$$l_d = 0.45 \frac{k_1 k_4}{\left[d_{cs} + K_{tr} \frac{E_F}{E_S} \right]} \frac{f_{FRP}}{f_{cr}} A_{FRP}$$

Donde:

$$K_{tr} = 0.45 \frac{A_{tr} f_y}{10.5 s n}$$

A_{tr}	=	área de refuerzo transversal (mm ²)
f_y	=	esfuerzo de fluencia (MPa)
s	=	espaciamiento de los estribos (mm)
n	=	número de barras traslapadas

$$\left[d_{cs} + K_{tr} \frac{E_F}{E_S} \right] = \text{no puede exceder 2.5 veces el diámetro de la barra}$$

k_1	=	factor de ubicación de barra (tomado como 1.3 para refuerzo ubicado de tal manera que haya más de 300 mm de concreto debajo de la longitud de desarrollo y 1.0 para otras condiciones)
-------	---	--

k_4	=	factor del tipo de fibra (tomado como 1.0 para fibras de carbón o de vidrio y 1.25 para fibras de aramida).
-------	---	---

E_S	=	módulo de elasticidad del acero
-------	---	---------------------------------

E_F	=	módulo de elasticidad del FRP
-------	---	-------------------------------

A_{FRP}	=	área de refuerzo de FRP (mm ²)
-----------	---	--

f_{FRP}	=	resistencia a la tensión de la barra de FRP (MPa)
-----------	---	---

f_{cr}	=	módulo de rotura del concreto (MPa)
----------	---	-------------------------------------

A continuación, se presentan algunas de las investigaciones que se han desarrollado para definir diferentes modelos matemáticos que permiten evaluar la longitud de desarrollo requerida en barras de FRP. Además, se complementa esta revisión bibliográfica con reportes de investigaciones enfocadas en la evaluación de la capacidad de los muros sometidos a cargas fuera del plano.

3. Estado del arte

La búsqueda bibliográfica de artículos científicos para sustentar el proyecto de investigación se realizó a través de una serie de bases de datos habilitada por la Escuela Colombiana de Ingeniería como Scopus y ScienceDirect, filtrando los resultados por medio de las palabras claves relacionadas con el tema de investigación, las cuales se relacionan a continuación:

Mampostería (Masonry)

Polímeros reforzados con fibras (Fiber Reinforced Polymers)

Longitud de traslapo (splice length)

Adherencia (bond)

Esfuerzo a flexión (flexural strength)

De la búsqueda realizada se obtuvo una gran cantidad de artículos de investigación, sin embargo, estos se enfocan en establecer o comparar modelos matemáticos para evaluar la longitud de desarrollo de barras de FRP utilizadas como refuerzo interno, pero en elementos de concreto de diferentes resistencias (resistencia normal, alta resistencia y concretos de ultra altas prestaciones) sometidos a flexión.

Para soportar bibliográficamente la investigación que se propuso, también se realizó una revisión de los artículos cuyo objetivo se centraba en evaluar el comportamiento mecánico de muros de mampostería que utilizaban los polímeros reforzados con fibras como refuerzo interno o externo. Las investigaciones que utilizan el FRP, tanto en barras como en bandas, tenían como objetivo establecer procedimientos para el reforzamiento de elementos estructurales. Los principales modos de falla que se encontraron en este tipo de reforzamiento fueron debidas al desprendimiento del FRP del elemento estructural (Al-Jabari et al., 2015), lo que refuerza la necesidad de incluir en el análisis y diseño de estos elementos estructurales, las barras de FRP utilizadas como refuerzos interno de la mampostería.

Finalmente, de la revisión bibliográfica de la base de datos se extraen un par de artículos en los cuales se compara el uso del refuerzo tanto del acero como de FRP en estructuras de concreto, y, además un estudio experimental donde se evalúa el aumento de la resistencia a flexión de muros de mampostería de concreto sin reforzar, reforzados con acero convencional y con barras de GFRP.

El proceso de búsqueda también se realizó en los repositorios de diferentes universidades de la cual se extraen 3 proyectos de investigación, 2 de ellos en los

cuales se utiliza el FRP en forma de barras para refuerzo interno de muros de mampostería desarrollada en la Escuela Colombiana de Ingeniería y el otro es un proyecto que se realizó en la Universidad de Saskatchewan de Canadá, donde se ejecutó un banco de pruebas en muros de mampostería para ajustar la ecuación de traslapo mínimo de barras de acero como refuerzo interno.

A continuación, se presentan las investigaciones relacionadas con el análisis del esfuerzo de adherencia desarrollado en vigas y las barras de FRP:

Desempeño de la adherencia del refuerzo de barras de BFRP traslapado en zonas sometidas a tensión implementadas vigas de concreto de alta resistencia (Eltantawi et al., 2022)

Esta investigación evaluó el esfuerzo de adherencia entre el concreto de alta resistencia y las barras de polímero reforzada con fibras de basalto (BFRP). A partir de la revisión bibliográfica lograron evidenciar que los factores que comúnmente afectan la interacción entre las barras de refuerzo de FRP y el concreto, son la superficie de las barras, resistencia a la compresión del concreto y las condiciones de carga; sin embargo, los estudios desarrollados no han sido específicos respecto al uso de barras de FRP reforzadas con fibras de basalto, lo cual puede evidenciarse en la ausencia de modelos matemáticos para definir la longitud de desarrollo de este tipo de barras en los códigos de diseño (ACI 440.1R-15, CSA S806-12). Por lo tanto, según los autores, este estudio es el primero en abordar el desempeño de la adherencia del refuerzo de BFRP empalmado por traslapo en una zona de tensión en vigas de concreto de alta resistencia.

Para llevar a cabo el estudio experimental se fabricaron 10 vigas de concreto reforzado con barras de BFRP. Estas vigas se dividieron en dos grupos teniendo en cuenta la superficie de las barras (cubierta de arena o enrollada helicoidalmente). Las vigas tenían una sección transversal de 300x450 mm y longitudes de 3900 mm. Todas las vigas fueron diseñadas de tal manera que la falla estuviera gobernada por tensión antes que el concreto fallara por aplastamiento.

El refuerzo en tensión de las vigas consistía en dos barras empalmadas, que variaban para cada espécimen (400 mm a 1200 mm), dentro de la región de momento constante. Se evaluaron diferentes porcentajes de refuerzo respecto a la cuantía balanceada (74%, 45% y 33%) determinada de acuerdo con las disposiciones del CSA S806-12. Como refuerzo a compresión se dispuso de dos barras de acero convencional

de 8 mm de diámetro. Además, se dispuso refuerzo transversal de 10 mm de diámetro con una separación de 150 mm en toda la longitud de la viga.

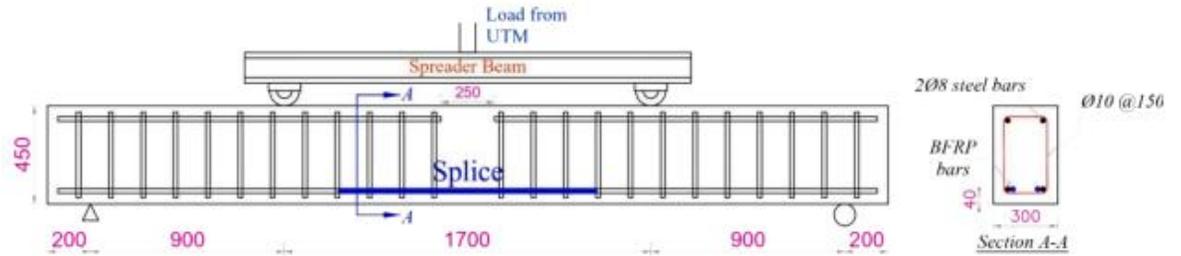


Figura 3. Detalle de las vigas instrumentadas (Eltantawi et al., 2022)

Las vigas fueron ensayadas bajo carga en cuatro puntos hasta que se presentó la falla. Las medidas de carga, deflexión y deformación fueron recolectadas por un sistema de adquisición de datos. Se dispuso de galgas extensiométricas en las barras longitudinales de BFRP en la zona de momento constante. La superficie superior de la viga, sometida a esfuerzos de compresión también se instrumentó con galgas. Las deflexiones de la viga fueron medidas a ambos costados, mediante la utilización de LVDT's.

También se llevó a cabo un control en la resistencia a la compresión y módulo de rotura en cilindros de concreto y vigas, respectivamente. La resistencia a la compresión a los 28 días fue de aproximadamente 85 MPa y el módulo de rotura de 7.5 MPa.

De los resultados experimentales obtenidos se observó un comportamiento lineal hasta la formación de la primera fisura, independientemente de la textura de la superficie, la longitud del empalme o el diámetro de la barra. Posteriormente se incrementó la formación de grietas en la zona de momento constante acompañado de una pérdida de rigidez del elemento hasta la falla. Como se esperaba las vigas con longitudes de desarrollo y cuantías mayores mostraron una menor degradación en su rigidez respecto a una carga específica.

Del programa experimental se tuvieron dos modos de falla diferentes, uno debido al desprendimiento entre el concreto y la barra de refuerzo y otro debido a la ruptura de la barra. Como era de esperarse el primer modo de falla se presentó para los especímenes con menores longitudes de desarrollo mientras que la ruptura del refuerzo se presentó para los de mayor longitud de desarrollo.

Los autores también concluyen que la longitud de desarrollo es proporcional al diámetro de la barra de refuerzo; por lo tanto, del análisis de los resultados obtenidos,

recomiendan el uso de barras de diámetros menores, las cuales presentan un mejor comportamiento mecánico en el traslapo.

Además, pudieron concluir que la superficie de las barras de BFRP no presenta un cambio significativo en el comportamiento mecánico de las vigas, ya que, para las barras con una superficie cubierta de arena, que presentó un mejor comportamiento en la adherencia con el concreto, se definió una longitud de desarrollo crítica menor, en aproximadamente el 5% comparado con la barra enrollada helicoidalmente.

Conexiones traslapadas de barras de acero y FRP en estructuras de concreto reforzadas a flexión (Zhou et al., 2022)

Teniendo en cuenta el enfoque de cuidado ambiental que se debe garantizar durante el desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería en la actualidad, cada vez se vuelve más urgente el control del consumo energético para mantener condiciones adecuadas de temperatura y confort al interior de una edificación. En las edificaciones esta pérdida de energía se presenta sobre todo debido a la conductividad térmica de los materiales utilizados convencionalmente en la construcción.

Para lograr un diseño que permita una mayor conservación de la energía es necesario pensar en elementos con una baja conductividad térmica, por lo que la utilización de barras de FRP en juntas de aislamiento son de gran valor. Sin embargo, sería necesario utilizar este refuerzo de FRP únicamente en aquellos elementos estructurales que se vean sometidos a cambios de temperatura como en los voladizos, por lo cual los autores establecen la necesidad de evaluar el comportamiento de la continuidad del refuerzo por medio de traslapos, entre una barra de acero y una barra de FRP, teniendo en cuenta la diferencia en el comportamiento mecánico de las mismas.

Para resaltar la importancia de llevar a cabo un programa experimental que permita evaluar la longitud de desarrollo para la conexión entre barras de acero y de FRP, los autores realizaron una revisión bibliográfica de las investigaciones relacionadas con la evaluación del comportamiento de este tipo de conexiones en barras del mismo material, para así establecer similitudes y variaciones de los mismos.

Existen dos maneras de realizar la conexión de dos barras de acero por medio de un traslapo, con contacto o sin contacto. El primero de estos consiste en unir las dos barras con alambre. Para el caso del traslapo sin contacto se debe garantizar que la separación entre estas cumpla con los requisitos específicos por norma, que para el

caso del ACI 318-19, define que esta separación no debe ser mayor al 20% de la longitud requerida para traslapar las barras. En un estudio referenciado por los autores (S. J. Chamberlin, 1952), encontraron que el esfuerzo de adherencia era prácticamente el mismo cuando el espacio libre entre barras variaba entre 0 y 6 veces el diámetro de la barra. Además, en otra de las investigaciones revisadas, se concluye que las barras traslapadas sin contacto desarrollaron un esfuerzo de adherencia mayor que las de contacto; sin embargo, se estableció que la distancia óptima es de 5 veces el diámetro de la barra.

Sin embargo, algunas de las desventajas en este tipo de conexiones, es el aumento en los costos debido a las longitudes de desarrollo sobreestimadas. Para evitar el aumento en el costo, se han definido otro tipo de conexiones como los conectores mecánicos o por medio de soldadura.

En cuanto a la conexión de barras de FRP se han utilizado metodologías similares, a excepción de la soldadura dada la naturaleza propia de este refuerzo. Una de las investigaciones (Lees et al., 1995) relacionadas con el comportamiento de las conexiones mecánicas para barras de FRP, consistió en la utilización de tubos de acero y cemento expansivo para conectar barras de AFRP. De esta investigación concluyeron que era poco probable que se indujeran concentraciones de esfuerzo en este procedimiento de conexión. Sin embargo, esta metodología no era muy factible para ser utilizada en la industria debido a ciertos requisitos constructivos que se controlaban únicamente en laboratorio.

Además, de la revisión bibliográfica desarrollada por los autores, observaron que el número de factores que se consideran en el cálculo de la longitud de desarrollo para las barras de FRP es menor que para el acero.

Otro de los aspectos comparados por los autores, respecto a la evaluación de la longitud de desarrollo para el acero y el FRP, fue el desarrollo de programas experimentales para evaluar el comportamiento mecánico de elementos reforzados con ambos materiales.

En el caso del acero se recopilaron un total de 147 resultados experimentales de probetas sometidas a flexión pura, que tenían resistencias a la compresión del concreto que variaban entre 22.5 MPa y 89.7 MPa, los diámetros de barra utilizados estaban dentro de un rango de 10 mm y 63.5 mm y utilizaban de 1 a 4 barras traslapadas. Finalmente, las longitudes de desarrollo evaluadas variaron entre 10 y 94 veces el diámetro de la barra. De esta revisión lograron concluir que el modo de falla

predominante que se presentó en los diferentes elementos ensayados se debe al desprendimiento del recubrimiento de concreto, cuando el esfuerzo de adherencia entre las barras y el concreto supera el límite de su capacidad; previo al desprendimiento del material se evidencian el desarrollo de grietas longitudinales en la superficie inferior de las vigas, justo en el lugar donde se ubica el refuerzo.

Para el caso de las barras de FRP se recopilaron un total de 165 resultados experimentales de probetas sometidas a flexión pura, que tenían resistencias a la compresión que variaban entre 23 MPa y 72 MPa, los diámetros de barra utilizados estaban dentro de un rango de 10 mm y 25 mm y utilizaban de 1 a 9 barras traslapadas. Finalmente, las longitudes de desarrollo evaluadas variaron entre 10 y 147 veces el diámetro de la barra. De esta revisión lograron concluir que, al igual que el acero, el modo de falla predominante se debe al desprendimiento del recubrimiento de concreto, debido a la falta de confinamiento en la sección que se encuentra traslapada.

Finalmente, concluyen que, a pesar de presentar ciertas similitudes en los modos de falla de estructuras reforzadas con los dos materiales, se hace necesario profundizar en la investigación del comportamiento de barras traslapadas, pero de diferentes materiales, teniendo en cuenta la variación en sus propiedades mecánicas como: módulo de elasticidad, superficie de la barra y comportamiento a la falla del refuerzo.

Longitud de desarrollo de barras de GFRP con una superficie de arena embebidas en concreto de ultra altas prestaciones con recubrimiento muy pequeño (Michaud et al., 2021)

Este proyecto de investigación tenía como objetivo principal evaluar la variación del esfuerzo de adherencia en función de las características propias de las barras de GFRP utilizadas y el concreto de ultra altas prestaciones (UHPC, por sus siglas en inglés) en elementos sometidos a flexión. La determinación de este esfuerzo estuvo en función de un análisis entre la fuerza de tensión en la barra y la fuerza de fricción desarrollada entre la barra y el concreto circundante.

El programa experimental consistió en la construcción de 28 vigas de concreto UHPC, que incluían en la mezcla un porcentaje de fibras respecto al volumen total de la viga; las fibras utilizadas fueron de acero (2% y 4%) y de polietanol (2% y 3%).

El porcentaje de fibras de acero utilizadas representan el límite superior e inferior para uso práctico en la industria, mientras que el límite inferior las fibras de

polietanol se definió para comparar los resultados del acero y el límite superior aquel que permite una trabajabilidad adecuada de la muestra.

La barra de FRP implementada para la construcción de estos especímenes fue #4, con una resistencia nominal de 1100 MPa y un módulo de elasticidad de 60 GPa. Esta fue ubicada a una distancia igual al diámetro medido desde la superficie inferior de la viga hasta el borde inferior de la barra; la colocación de la barra de GFRP estuvo definida teniendo en cuenta dos factores importantes: aprovechar la capacidad superior de resistencia del UHPC y la característica no corrosiva del refuerzo. La longitud de desarrollo de estas barras varió de 4 a 16 veces el diámetro de la barra de refuerzo.

Los especímenes de ensayo se construyeron en dos mitades, separadas por una cavidad de aproximadamente 18 mm en la parte inferior y de 53 mm en la parte superior donde se ubicó un pasador de acero que permitía establecer de forma más exacta el brazo de palanca del momento resistente de la sección. Además, se dispuso cuatro barras #2 de acero, para evitar una falla repentina de los especímenes. La sección transversal de estas vigas fue de 130x150 mm y longitudes variables de 650 mm y 710 mm.

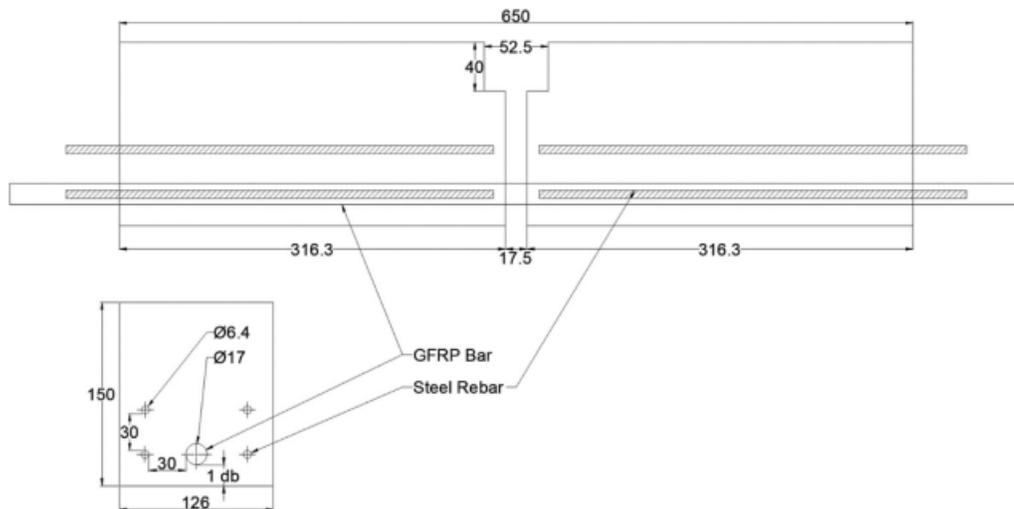


Figura 4. Esquema del espécimen de ensayo (las dimensiones están en mm). (Michaud et al., 2021)

Para el montaje de ensayo se dispuso de tres potenciómetros lineales para medir los desplazamientos de la barra de refuerzo en cada extremo y las deflexiones de la viga en una sección cercana al centro de la luz.

Con los resultados experimentales obtenidos se pudo observar que este esfuerzo de adherencia fue mayor en los especímenes con fibras de acero respecto a

las reforzadas con polietanol. Este esfuerzo de adherencia también aumentó con el porcentaje de fibras utilizadas, pero se redujo con la longitud de desarrollo de la barra. Este comportamiento tendía a mantener un valor constante para longitudes de desarrollo superior a 10 veces el diámetro. El esfuerzo de adherencia desarrollado en las vigas de concreto UHPC con fibras de acero con un porcentaje del 4% y del 2% fue de 15 MPa y 12 MPa, respectivamente; mientras que para el concreto UHPC con fibras de polietanol con un porcentaje de 3% y 2% fue de 9 MPa y 6 MPa, respectivamente. De lo anterior les fue posible concluir que se requiere una menor longitud de desarrollo para mayores resistencias a la compresión de los concretos, teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos.

Finalmente, se compararon los resultados con los modelos matemáticos establecidos en las guías de diseño de Estados Unidos (ACI 440.1R-15) y Canadá (CSA S806-12), en las que se pudo establecer que, si bien son conservadoras, estas ecuaciones llegan a sobre estimar las longitudes de desarrollo requeridas en UHPC en factores de hasta 4 veces para fibras de acero y de 5.7 veces para fibras de polietanol. Cuando se omiten los valores del límite para la resistencia a la compresión establecidas en los modelos matemáticos para evaluar la longitud de desarrollo, estos llegan a reducirse hasta 2.6 y 2.4 para las fibras de acero y las de polietanol, respectivamente. Este comportamiento conservador de las guías de diseño los lleva a definir el siguiente modelo matemático:

$$\frac{l_d}{d_b} = \frac{1538}{\sqrt{f'_c}} - 113$$

Ecuación 8. Modelo matemático para establecer la longitud de desarrollo en elementos UHPC. (Michaud et al., 2021)

Sin embargo, los autores aclaran que este modelo ha sido obtenido en función de un programa experimental un tanto reducido, ya que, únicamente está teniendo en cuenta un diámetro de la barra de refuerzo y un rango de resistencias a la compresión entre 87 y 132 MPa, por lo que esta ecuación debería usarse con cautela.

Modelos matemáticos para definir la longitud de desarrollo y el esfuerzo de adherencia para barras de FRP embebidas en concreto (Basaran & Kalkan, 2020)

Esta investigación estuvo relacionada con la determinación de un modelo matemático para determinar la longitud de traslapo en vigas de concreto, de barras de

FRP de diferentes materiales y acabados superficiales. El proyecto consistió en plantear una regresión lineal múltiple, teniendo en cuenta una base de datos de 185 pruebas experimentales, de las cuales 51 eran parte del alcance del estudio que realizaron. Los 134 resultados restantes, correspondían a una recopilación de los resultados de otras investigaciones desarrolladas en el tema. La gran mayoría de los estudios, se centraron en evaluar la capacidad de adherencia entre los dos componentes (concreto y refuerzo), diseñados para una falla controlada por la extracción del refuerzo, sin embargo, este no es el comportamiento al cual se ve sometido el refuerzo; por lo tanto, los métodos basados en vigas sometidos a flexión que inducen tensión indirecta al refuerzo simulan con una mejor precisión los efectos a los cuales se ven sometidos en la práctica.

Según los investigadores, la adherencia entre el concreto y las barras de FRP se ve afectada por una mayor cantidad de factores, comparado con interacción entre el concreto y el acero convencional. Algunos de estos factores son: tipo de refuerzo de las barras de FRP (AFRP, BFRP, CFRP, GFRP), acabado de la superficie de la barra, diámetro del refuerzo, longitud de desarrollo, recubrimiento mínimo, resistencia a compresión del concreto, refuerzo transversal, entre otros.

A partir de un análisis de los diferentes modelos matemáticos y los resultados obtenidos en las otras investigaciones lograron evidenciar que la longitud de desarrollo de los diferentes códigos de diseño tan solo tiene en cuenta algunos de los factores que afectan la adherencia entre el FRP y el concreto, y, además producen resultados extremadamente conservadores y no económicos para ser implementados en la construcción.

Las vigas construidas y ensayadas dentro del alcance del proyecto tenían secciones transversales variables desde 102x240 mm hasta 240x240 mm. La longitud de los especímenes era de 800 mm. En todas las vigas se utilizaron estribos con un diámetro de 8 mm, de dos ramas y con una separación constante de 50 mm en toda la longitud de la viga para controlar y limitar el agrietamiento por tensión diagonal. Además, se dispuso de otras dos barras de 8 mm de diámetro, dispuestas longitudinalmente en la mitad de la altura también para controlar el agrietamiento, y otras dos barras de refuerzo, igualmente de 8 mm de diámetro, fueron dispuestas en la zona sometida a compresión para amarrar los estribos.

La viga se encontraba instrumentada con dos potenciómetros, uno a cada extremo de la barra del refuerzo inferior, que permitía medir el desplazamiento respecto a la carga externa inducida.

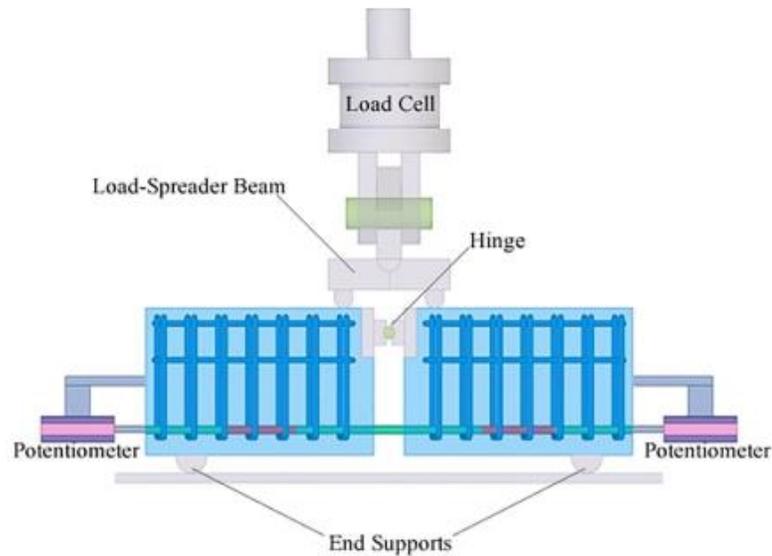


Figura 5. Configuración experimental. (Basaran & Kalkan, 2020)

Teniendo en cuenta el análisis estadístico de la base de datos, los autores determinaron dos ecuaciones para definir la longitud de traslapo, una teniendo en cuenta factores lineales y otra con factores cuadráticos. A pesar de que la ecuación con factores cuadráticos tiene un coeficiente de correlación estadística R^2 un 5% mayor con los factores lineales, al realizar la validación de la ecuación con valores de entrada aleatorios por fuera del rango para cada una de las variables de análisis, no se obtienen resultados coherentes; por lo tanto, los autores proponen el siguiente modelo matemático para la determinación de la longitud de desarrollo:

$$l_d = \frac{23.81 f_{tsp} d_b - 0.89 f_{FRP} d_b}{f_{tsp}^2 + 0.44 f_{tsp} d_b - 3.55 f_{tsp} S}$$

Ecuación 9. Longitud de desarrollo para barras de FRP. (Basaran & Kalkan, 2020)

Donde:

l_d : longitud de desarrollo

f_{tsp} : módulo de rotura del concreto

d_b : diámetro de la barra de refuerzo

f_{FRP} : resistencia máxima de la barra de FRP

S: coeficiente relacionado con el tipo de fibra y superficie de la barra

Finalmente, los autores recomiendan que el uso de esta ecuación se realice para valores de entrada que se encuentren dentro del rango en los que se encuentran los resultados de las investigaciones desarrolladas en el tema.

Evaluación de la longitud de traslapo requerida para barras de refuerzo de acero en muros de mampostería (Kelln, 2014)

El proyecto de investigación desarrollado en Canadá consistió en establecer un banco de ensayos experimentales sobre de muros de mampostería de dimensiones variables, lo cual permitió obtener diferentes cuantías de refuerzo, buscando evaluar la relación que se presenta entre los valores teóricos, obtenidos del análisis estructural conforme lo establecen las normas de diseño, y los resultados arrojados por los instrumentos de medición utilizados sobre cada especímenes como galgas y transductores de desplazamientos LVDT.

A partir de los datos obtenidos en la instrumentación de los muros se desarrolló una ecuación para determinar la longitud mínima de traslapo relacionando el diámetro de las barras de acero, la cual fue comparada con las establecidas en la norma de diseño de Canadá y Estados Unidos.

Los muros dispuestos para la investigación estaban contruidos con bloques de concreto. Se construyeron muros de las siguientes dimensiones: alturas entre 13 y 15 hiladas y longitudes horizontales de 2,5 y 3,5 bloques. La definición de las dimensiones de los muros era un factor importante, ya que, se requería que la falla de los especímenes fuese dúctil, es decir, que el acero de refuerzo alcanzara su esfuerzo de fluencia antes de que se alcanzara la deformación máxima a compresión en el concreto.

En cuanto al montaje establecido para la ejecución de las pruebas, no se dispuso ningún tipo de elemento externo que permitiera medir la deformación en las barras de acero de refuerzo, como galgas, ya que, el recubrimiento que se requiere para evitar el daño de estos instrumentos debido al mortero circundante generaría una pérdida de adherencia entre el refuerzo y el material cementante, lo cual afectaría considerablemente el análisis de los resultados. Sin embargo, para determinar los esfuerzos y las deformaciones de las barras de acero, se llevó a cabo un análisis numérico basado en la curvatura del muro.

Basados en los resultados obtenidos, se propuso una ecuación predictiva para definir la longitud de traslapo, establecida a partir de la extrapolación de las cargas máximas soportadas por el elemento, antes de la falla por aplastamiento de la mampostería; además se realizó un ajuste estadístico para reducir el punto de corte de las curvas de esfuerzo contra longitud de traslapo para así tener un rango de confiabilidad mayor al 95%. La ecuación definida en la investigación se muestra a continuación:

$$T_r = 299 - 27.6 d_b + 0.692 d_b^2 + 0.189 l_s \text{ [kN]}$$

Ecuación 10. Tensión mínima requerida en las barras de acero utilizadas como refuerzo de muros de mampostería. (Kelln, 2014)

La expresión anterior permite determinar la tensión mínima requerida, que para este caso es igual al esfuerzo de fluencia en el acero, en términos del diámetro de la varilla y la longitud de traslapo.

Posteriormente se lleva a cabo la comparación de los resultados obtenidos de la ecuación predictiva con las ecuaciones definidas en las normas de Canadá y Estados Unidos, los cuales se resumen en la siguiente tabla:

Bar Size (mm)	Splice Length Calculated Using Equation 4.3 (mm)	Code Provision Splice Length Requirements (mm)			Code-to-test Calculated Ratios of Splice Lengths		
		CSA S304.1-04 Class A	CSA S304.1-04 Class B	TMS 402-13	CSA S304.1-04 Class A	CSA S304.1-04 Class B	TMS 402-13
No. 15	390	440	575	485	1.13	1.47	1.24
No. 20	740	590	765	1155	0.793	1.03	1.56
No. 25	1060	920	1195	2140	0.865	1.12	2.02

Tabla 1. Comparación de la ecuación predictiva ajustada con los requerimientos en las normas vigentes (Kelln, 2014)

En consecuencia, se propuso realizar una serie de ajustes a los coeficientes relacionados con el diámetro de la barra en las ecuaciones planteadas en las normas, aumentándolos en los casos en que la relación de la longitud de traslapo de la norma y la longitud de traslapo de la ecuación predictiva tuvieran valores menores a 1, mientras en los casos en que esta relación fuese mayor a 1 se propuso reducir dichos coeficientes.

Continuando la presentación de algunos resultados de investigación que dan soporte al proyecto desarrollado, es importante conocer la capacidad a flexión, el comportamiento estructural y el modo de falla de los muros reforzados con FRP, tanto de manera interna como externa. De esta manera se presentan las siguientes investigaciones:

Comportamiento ante carga perpendicular al plano, de muros De mampostería en concreto, reforzados con barras de FRP (Otálora, 2017) y Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP (Quintana Ruiz, 2017)

Para este caso se presentan dos investigaciones desarrolladas en la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Estas investigaciones tenían como objetivo principal ajustar las ecuaciones descritas en las normas de diseño aplicables a concreto reforzado internamente con barras de FRP y mampostería reforzada internamente con acero (ACI 440.1R-15 y el TMS-402) para establecer la capacidad teórica de muros mampostería reforzados internamente con barras de FRP.

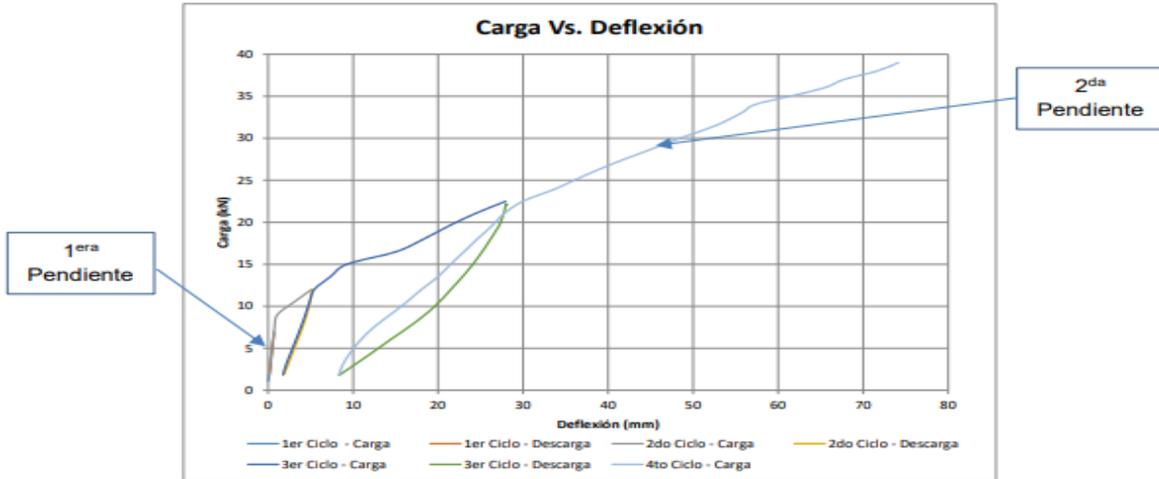
Inicialmente se estableció la relación teórica que permitía calcular la capacidad a flexión y modos de falla de muros de mampostería en arcilla y concreto ante cargas fuera del plano, ya presentada en el marco de referencia, y se validó mediante la construcción de muros de mampostería tanto de concreto como de arcilla, variando la longitud horizontal de estos para establecer un rango suficiente de cuantías de refuerzo. Los muros estaban reforzados principalmente con barras de FRP (GFRP y CFRP); a la vez, se construyó un muro control, reforzado con barras de acero estructural para comparar los resultados del muro reforzado con barras de FRP, que presentaba una capacidad resistente de momento similar. Las dimensiones de los especímenes de ensayo tenían las siguientes características: alturas de 220 cm, espesor de 14 cm y longitud horizontal variables. La instrumentación de cada uno de los especímenes consistió en galgas extensiométricas para evaluar las deformaciones desarrolladas en las barras de FRP y, además, se dispuso LVDT's para medir las deflexiones al centro de la altura del muro.

Es importante resaltar que los muros reforzados con barras de FRP, de acuerdo con los cálculos teóricos presentarían una falla controlada por compresión, es decir, que las barras de refuerzo de FRP no alcanzarían su esfuerzo de ruptura, sino que el

concreto fallaba por aplastamiento. Sin embargo, estos muros reforzados con barras de FRP desarrollaban deformaciones aceptables necesarias para garantizar una adecuada ductilidad del elemento.

Teniendo en cuenta el protocolo de carga establecido para el ensayo de los muros de mampostería, se logró comprobar una de las propiedades más relevantes de las barras FRP, que es su comportamiento lineal hasta la falla, es decir, que el material tiende a recuperar las deformaciones generadas debido a la carga externa a la cual se ve sometido.

Por otra parte, de las gráficas obtenidas de los ensayos es posible observar que los muros reforzados con CFRP presentaron menores deflexiones que los muros reforzados con GFRP para una misma sollicitación de carga; dado que las barras de CFRP tienen un módulo elástico más alto. Comparando los resultados arrojados por la instrumentación del muro fue posible afirmar que los muros reforzados con CFRP ofrecían una mayor resistencia a la flexión que los muros reforzados con GFRP, sin embargo, la carga que generaba el agrietamiento del muro fue mayor para los muros reforzados con GFRP que los reforzados con CFRP. Además, en la curva de fuerza relacionada con las deflexiones de ambos tipos de refuerzo fue posible evidenciar dos pendientes diferentes, una primera pendiente de gran magnitud hasta el punto donde se presenta el primer agrietamiento de la mampostería y posteriormente una disminución considerable de esta pendiente hasta el punto de falla. Esta diferencia se presenta debido al cambio en las propiedades iniciales de la sección debido al agrietamiento y separación de las unidades de mampostería y el mortero de pega en la zona que se encuentra sometida a esfuerzos de tensión.



Gráfica 2. Carga vs. Deflexión típica de los muros de mampostería de concreto reforzada con FRP. (Otálora, 2017)

Después de llevar a cabo un análisis estadístico de los datos obtenidos experimentalmente que permitan obtener un grado de confiabilidad del 90% fue posible afirmar que el comportamiento de los muros sometidos a cargas fuera del plano era el esperado, validando los valores teóricos de la capacidad a flexión desarrolladas en las investigaciones de Otálora y Quintana, siempre y cuando se tenga en cuenta el factor de reducción del momento último que soporta el elemento basados en el tipo de falla esperado, que para el caso de la investigación desarrollada por Otálora y Quintana presentaba un valor de 0,65 ya que se esperaba una falla por aplastamiento de la mampostería. Por otra parte en ambas investigaciones se llevó a cabo la construcción de muros de mampostería reforzados con acero estructural con los cuales se buscaba que tuvieran la misma capacidad a flexión con alguna de las configuraciones de muro reforzado con GFRP, de donde se presenta una menor rigidez de los muros reforzados con barras de FRP al compararlos con los reforzados con acero convencional, ya que, el módulo de elasticidad de las barras de acero estructural es aproximadamente 4 veces mayor al módulo de elasticidad de las barras de GFRP, de esta manera, para aumentar la rigidez del elemento sería necesario aumentar la cantidad de varillas de refuerzo de FRP, concluyó Quintana en su investigación.

Influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP ante cargas fuera del plano (Urbina Gómez, 2020)

Esta investigación también desarrollada en la Escuela Colombiana de Ingeniería representó una extensión a los dos proyectos anteriores.

Esta investigación tenía como objetivo principal evaluar la influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión de los muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP ante cargas fuera del plano.

Inicialmente se estableció la capacidad teórica a flexión fuera del plano y los modos de falla de esperados de muros reforzados con barras continuas y barras traslapadas, lo cual, fue validado posteriormente mediante la construcción de muros de mampostería de concreto a escala real, utilizando barras de GFRP #4 y #5. La definición de la longitud de traslapo de las barras de refuerzo estuvo en función del modelo matemático dado en la norma de diseño del ACI 440.1R-15. Otra de las variables de análisis del comportamiento mecánico de los muros de mampostería fue la resistencia a la compresión del murete. Las dimensiones de los especímenes de ensayo tenían las siguientes características: alturas de 220 cm, espesor de 19 cm y longitud horizontal de 119 cm. La instrumentación de cada uno de los especímenes consistió en galgas extensiométricas para evaluar las deformaciones unitarias en la cara de compresión del muro y, además, se dispuso LVDT's para medir las deflexiones al centro de la altura del muro.

Por medio de un equipo de adquisición de datos se estableció la carga máxima de falla, la deformación máxima alcanzada y la deformación residual posterior a la carga máxima.

Tras aplicar el protocolo de carga establecido fue posible evidenciar que una de las propiedades más relevantes en el comportamiento de las barras de FRP es su comportamiento elástico hasta la falla. Por lo tanto, las deformaciones desarrolladas en los elementos no fueron permanentes.

Los modos de falla obtenidos del programa experimental fueron debido al aplastamiento de las unidades de mampostería, tal como lo predijo de manera teórica utilizando las ecuaciones ya desarrolladas en los proyectos desarrollados en la Escuela Colombiana de Ingeniería (Otálora, 2017; Quintana Ruiz, 2017)

Por lo tanto, basado en los proyectos de investigación revisados en el estado del arte y dados los avances logrados, se planteó el desarrollo del siguiente proyecto de investigación que complementa los proyectos ya realizados en la Escuela Colombiana de Ingeniería respecto al comportamiento fuera del plano de muros de mampostería reforzados internamente con barras de FRP, buscando validar las ecuaciones de capacidad planteadas en los proyectos anteriores y profundizar en la longitud de traslapo que se requeriría para estas barras al ser sometidas a flexión.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general:

Definir una expresión matemática que permita evaluar en función del diámetro, el traslape mínimo de las barras GFRP en muros de mampostería de concreto ante cargas fuera del plano.

4.2. Objetivos específicos:

Realizar un comparativo de las normas de análisis y diseño de países como Canadá y Estados Unidos, en los cuales se establecen los requisitos mínimos a tener en cuenta para el uso de barras FRP para elementos de concreto reforzado.

Evaluar la capacidad teórica de los muros, con base en las ecuaciones desarrolladas en investigaciones previas y plantear una ecuación preliminar para calcular la longitud de traslape en muros de mampostería reforzado con barras de GFRP teniendo en cuenta el diámetro de las barras.

Determinar la incidencia del traslape en la capacidad a flexión obtenida de los ensayos experimentales y la calculada a partir del análisis estructural del muro.

Comparar las ecuaciones de longitud de desarrollo de barras de FRP utilizadas como reforzamiento en estructuras de concreto de países como Canadá y Estados Unidos con el modelo matemático planteado.

5. Programa experimental

El programa experimental desarrollado, consistió en una ampliación del proyecto realizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería por (Urbina Gomez, 2020).

En la primera fase, desarrollada por el ingeniero Urbina se evaluó la influencia del traslapo de las barras de GFRP utilizadas como refuerzo interno en muros de mampostería, teniendo en cuenta algunas variables como:

- Diámetro de la barra de refuerzo
- Ubicación de la barra dentro de la celda (centrada o desplazada)
- Resistencia a compresión de la mampostería

En la segunda fase del proyecto, se amplió el programa experimental, teniendo en total 21 especímenes de ensayo (entre la fase 1 y fase 2). La definición de la geometría de los muros de ensayo fue con el objetivo de tener un amplio rango de resultados experimentales que permitiera desarrollar un análisis estadístico de los datos obtenidos, para así, plantear un modelo matemático que permitiera evaluar y/o validar la ecuación utilizada en la definición de la longitud de traslapo en el proyecto desarrollado por Urbina.

La caracterización mecánica de los componentes de los muros de mampostería (unidades de concreto, mortero de pega, mortero de relleno y barras de GFRP), fueron la base para la evaluación teórica de la capacidad de carga de los especímenes y la definición de protocolo de carga.

Finalmente, se llevó a cabo la construcción de los muros de mampostería que hacían parte de la siguiente etapa experimental, los cuales tenían las siguientes características:

- Altura constante de 2.2 metros que permitiera tener una luz libre de ensayo de 2 metros entre apoyos.
- Longitud horizontal del muro de 1.19 metros y 1.59 metros que permitió tener un rango de cuantías entre 0.22% y 0.38%.
- Espesores constantes igual a 0.19 metros.
- Resistencias a la compresión de los muros f'_m de 10.4 MPa y 17.3 MPa.
- Longitudes de traslapo que variaban para cada uno de los muros, dependiente de las dimensiones del muro y el diámetro de la barra de refuerzo.

Tanto los especímenes auxiliares usados para evaluar el comportamiento mecánico de los muretes, como los muros a escala real fueron construidos con mano de obra local.

A continuación, en la Tabla 2 se presenta la nomenclatura, características geométricas y refuerzo dispuesto en cada uno de los muros que fueron ensayados. Los muros que se encuentran resaltados de color rojo hacen parte del programa experimental desarrollado en la primera fase. (Urbina Gomez, 2020)

Muro	Altura cm	Longitud Horizontal cm	Espesor cm	Refuerzo	As mm ²	Cuantía %
4-1500-C-C						
4-1500-C-T-1.15-A	220	119	19	2#4	253	0.22
4-1500-C-T-1.15-B						
5-1500-C-C						
5-1500-C-T-0.94-A						
5-1500-C-T-0.94-B						
5-1500-C-T-1.06-A	220	119	19	2#5	396	0.35
5-1500-C-T-1.06-B						
5-1500-C-T-1.18-A						
5-1500-C-T-1.18-B						
5-1500-C-T-1.18-C						
5-2500-C-C						
5-2500-C-T-1.23-A	220	119	19	2#5	396	0.35
5-2500-C-T-1.23-B						
6-1500-C-C						
6-1500-C-T-1.35-A	220	159	19	2#6	570	0.38
6-1500-C-T-1.35-B						
5-1500-D-C	220	119	19	2#5	396	0.35
5-1500-D-T-1.18						
6-1500-D-C	220	159	19	2#6	570	0.38
6-1500-D-T-1.35						

Tabla 2. Resumen de los muros que hacen parte del programa experimental

Respecto a la nomenclatura para identificar los muros utilizada, es importante especificar el significado de cada una de las siglas: el primer valor define el número de la varilla de refuerzo de GFRP utilizado, para el programa experimental se utilizaron barras #4, #5 y #6. El número que se encuentra después del primer guion indica la resistencia a la compresión del muro (f'_m (psi)), que para este proyecto eran de 10.4 MPa (1500 psi) y 17,3 MPa (2500 psi). La constante que se encuentra después del segundo guion indica la posición de la varilla de refuerzo dentro de la celda, es decir, si esta se encontraba centrada “C” o desplazada “D” respecto al eje de la celda. La

siguiente contaste, después del tercer guion, indica si la varilla de refuerzo es continua “C” o se encuentra traslapada “T”, los especímenes con la barra continua fueron los muros de control y sirvieron de comparativo para evaluar la incidencia del traslapo en el comportamiento mecánico del muro. El siguiente valor que aparece al final, después del cuarto guion, indica la longitud de traslapo de la varilla para cada uno de los muros. Por último, el literal que se encuentra después del quinto guion, se utiliza para identificar los muros que tienen las mismas características de refuerzo.

Por ejemplo, el muro “**5-1500-C-T-1.23-A**” indica que este se encuentra reforzado con varilla #5, que el muro tiene una resistencia a la compresión de 1500 psi, además, el refuerzo está centrado respecto al eje de la celda, se encuentra traslapada una longitud total de 1.23 metros y se identifica ese muro en específico con la letra A.

5.1. Características de los materiales utilizados en la construcción de los especímenes de ensayo

5.1.1. Mortero de pega

El mortero utilizado para unir las unidades de mampostería de concreto es un mortero clasificado como tipo H, con una resistencia a la compresión promedio de f'_{cp} igual a 23.4 MPa. Teniendo en cuenta las condiciones de laboratorio controladas donde fueron construidos los muros, se garantizó una fluidez mínima dentro de un rango de 115 – 125 %, teniendo en cuenta las especificaciones dadas en las normas técnicas de ensayo (NTC 3329).

5.1.2. Mortero de relleno

El mortero de relleno (grout) utilizado para rellenar las celdas donde se encontraban las barras de refuerzo, tenía una resistencia a la compresión promedio, f'_{cr} de 28 MPa para los muros de f'_m igual a 10.4 MPa y de f'_{cr} 32 MPa para los muros de f'_m igual 17.3 MPa. Los ensayos para determinar las propiedades mecánicas del mortero de relleno fueron las establecidas en la norma NTC 4048.

5.1.3. Mampostería de concreto

Los bloques de mampostería de concreto de perforación vertical usados en la construcción de los muros cumplen con la norma NTC 4026. A continuación, se muestran las dimensiones de este bloque:

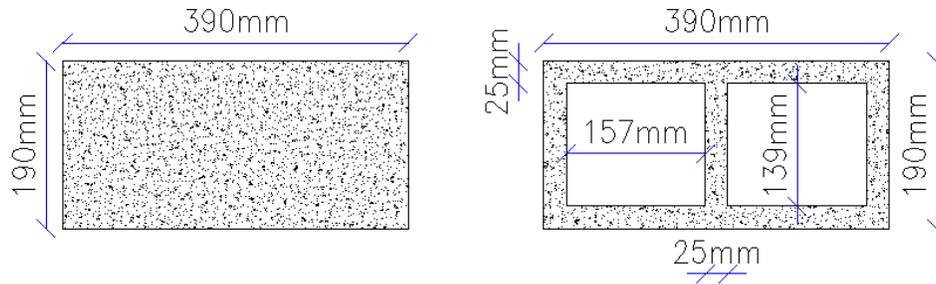


Figura 6. Dimensiones de las unidades de mampostería de concreto

5.2. Proceso constructivo

Los muros fueron construidos en el laboratorio de Estructuras, Materiales y Construcción de la Escuela Colombiana de Ingeniería, por mano de obra local.

A continuación, se presentan algunos de los aspectos más relevantes del proceso constructivo:

- Los muros se encontraban apoyados en vigas cuadradas de sección 25x25, reforzadas con barras #4 dispuesta de manera longitudinal y estribos #3 dispuesto cada 15 cm. En la siguiente figura se muestra un despiece general de la viga de apoyo:

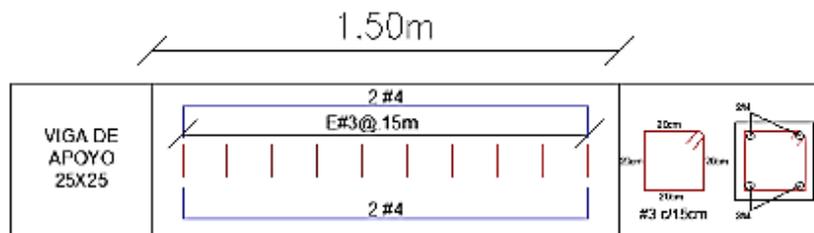


Figura 7. Despiece general de la viga de apoyo.

- Una de las variables de análisis del proyecto fue la disposición de las barras de refuerzo dentro de las celdas de la unidad de mampostería,

por lo tanto, era necesario garantizar que esta se ubicara lo más centrada posible. Para ello se dispuso de una serie de “centralizadores” al momento de la construcción para evitar que el proceso constructivo de llenar las celdas con mortero de relleno desplazara la barra, generando cambios en la capacidad de carga del muro.



Foto 1. Centralizadores utilizados durante el proceso constructivo

- Para garantizar la correcta disposición de las barras que se encontraban traslapadas, éstas eran cortadas lo más exacta posible, y con la ayuda de unos amarres en sus extremos se fijaba su posición inicial previo a la fundida de la celda. Mientras se iba llenando la celda con el mortero de relleno se llevaban a cabo medición de control para garantizar que el muro presentara las condiciones de análisis iniciales.



(a)



(b)



(c)

Foto 2. Proceso constructivo. (a) Verificación de longitudes de traslapo experimentales (b) Verificación de la posición de las barras de refuerzo durante el proceso constructivo (c) Llenado de celdas

5.3. Montaje de ensayo

Teniendo en cuenta el comportamiento mecánico, tanto del mortero de pega como del mortero de relleno, los muros fueron ensayados 28 días después de haber fundido las celdas donde se encontraban las barras de refuerzo de GFRP.

El montaje utilizado se muestra en la siguiente figura:

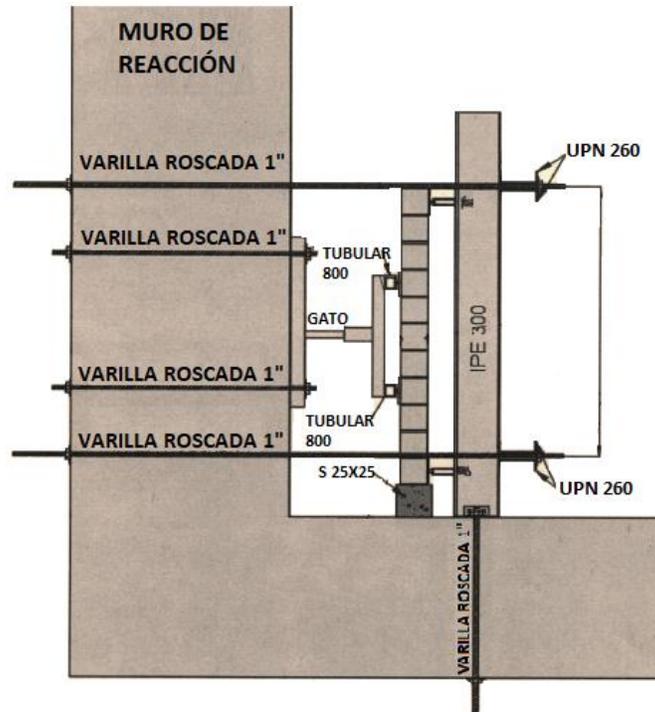


Figura 8, Montaje de ensayo.

A continuación, se muestra algunas de las evidencias fotográficas del montaje utilizado para llevar a cabo los ensayos de laboratorio.



(a)



(b)

Foto 3. Montaje de ensayo. (a) Vista lateral (b) Vista frontal

5.4. Instrumentación externa

Para el desarrollo de los ensayos de laboratorio, cada uno de los especímenes fue instrumentado con el fin de determinar las deflexiones al centro de la altura, en relación con la carga externa inducida. Sobre la cara del muro sometida a esfuerzos de tensión fue dispuesto un transductor de desplazamiento, LVDT. Además, en los perfiles utilizados como apoyos, se dispuso otro par de LVDT, para registrar los posibles desplazamientos de estos durante el ensayo.

Sobre la cara de compresión se dispuso una galga electrónica para medir las deformaciones unitarias debidas a los esfuerzos de flexión en esta cara.

La instrumentación utilizada y su localización se puede ver en la en la siguiente figura:

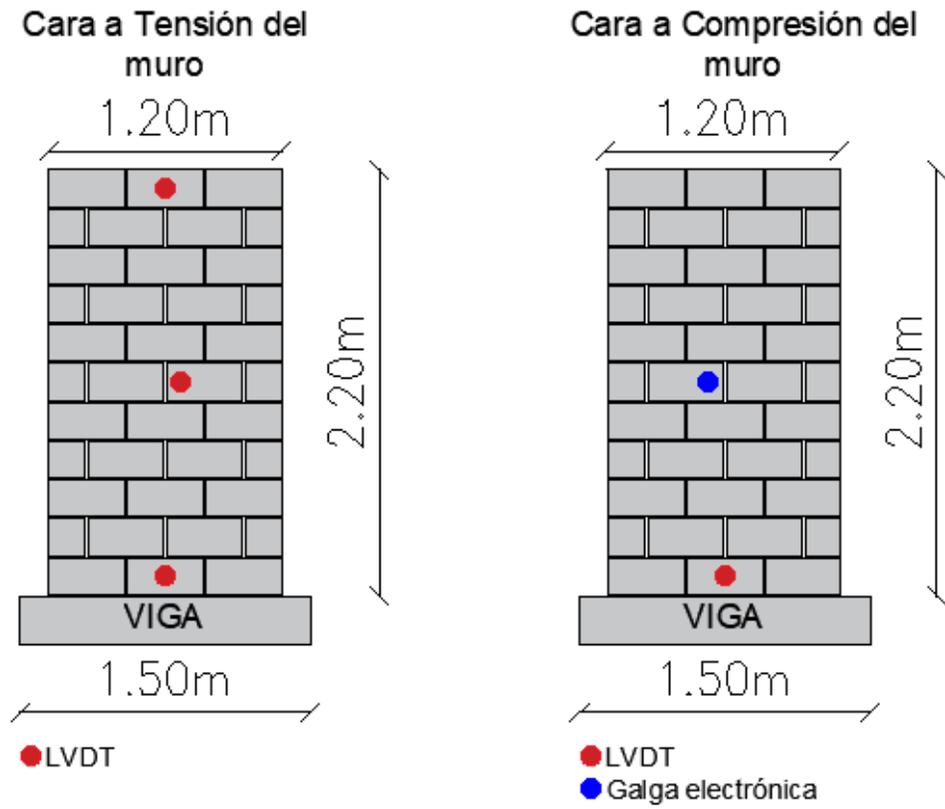


Figura 9. Instrumentación externa

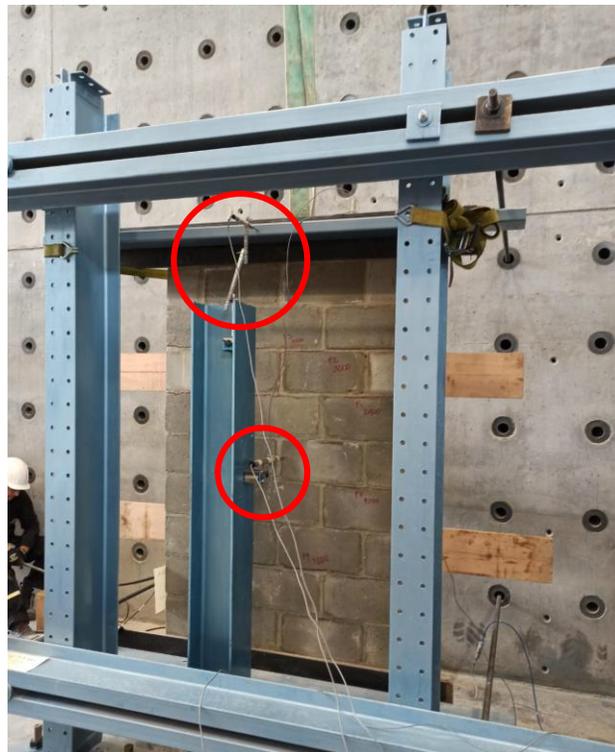


Foto 4. Instrumentación externa.

Cabe resaltar, que no se utilizó ningún tipo de instrumentación en las barras de refuerzo, ya que, durante el programa experimental se trataba de evaluar la capacidad de adherencia entre las barras de refuerzo y el mortero de relleno; por lo tanto, la utilización de los materiales necesarios para cubrir estos mecanismos de medición no era convenientes.

6. Cálculo teórico de la capacidad de los muros

Para definir la resistencia máxima de cada uno de los muros del proyecto, se determinó la capacidad teórica de cada uno, basados en las ecuaciones establecidas en el Marco de referencia.

Las propiedades de la mampostería que se tuvieron en cuenta para la evaluación de su capacidad de diseño fueron:

Propiedad de la mampostería	Magnitud	Unidad
f'_m	10.4 y 17.3	MPa
E_m	9000	MPa
ϵ_{mu}	0.0025	mm/mm
α_1	0.80	
β_1	0.80	

Las propiedades de las barras de GFRP que se tuvieron en cuenta para la evaluación de la capacidad de diseño de cada espécimen fueron:

Propiedad del refuerzo GFRP	Magnitud	Unidad
$f_{tu} \text{ (min)}$	1063	MPa
E_f	62100	MPa
ϵ_{fu}	0.0156	mm/mm

Es importante resaltar que la superficie de las barras utilizadas en el proyecto estaba cubierta por una arena gruesa.

A continuación, se presenta un ejemplo de los cálculos realizados:

Muro 4-1500-C-C

- **Cuantía balanceada**

$$\rho_{fb} = 0.80 \beta_1 \left(\frac{f'_m}{f_{fu}} \right) \left(\frac{E_f \epsilon_{mu}}{E_f \epsilon_{mu} + f_{fu}} \right)$$

$$\rho_{fb} = (0.8)(0.8) \left(\frac{10.4}{1208} \right) \left(\frac{(62100)(0.0025)}{(62100)(0.0025) + 1208} \right)$$

$$\rho_{fb} = 0.063 \%$$

De acuerdo con el resultado obtenido, la cantidad de refuerzo que se debería disponer para que el muro presentara una falla simultanea entre el aplastamiento de la unidad de mampostería y la rotura de la varilla de refuerzo, es tan solo, una varilla #3.

- **Modo de falla**

Para definir el modo de falla del muro es necesario comparar la cuantía dispuesta en este respecto a la cuantía balanceada.

$$\frac{\rho_{real}}{\rho_{fb}} = \frac{0.22}{0.063} = 3.5$$

Teniendo en cuenta que la cuantía dispuesta en el muro de 3.5 veces más que la definida para presentar una simultanea de los dos componentes, se espera que el modo de falla para este muro sea por aplastamiento en las unidades de mampostería, se prefiere este tipo de falla, dada la ausencia de plastificación de la barra de FRP lo cual produciría una falla explosiva.

- **Momento resistente**

Para definir el momento resistente del muro en análisis, se lleva a cabo el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la Figura 2.

Se asume inicialmente un valor de esfuerzo en la barra de GFRP aproximadamente del 40% del esfuerzo de rotura:

$$f_f = 480 \text{ MPa}$$

Con valor asumido del esfuerzo de tensión en el refuerzo se calcula la profundidad del bloque de compresiones en el muro:

$$a = \frac{A_f f_f}{\beta_1 f'_m b}$$

$$a = \frac{(253) (480)}{(0.8) (10.4) (1190)}$$

$$a = 12.3 \text{ mm}$$

Ahora se calcula la profundidad del eje neutro:

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$c = \frac{12.3}{0.8}$$

$$c = 15.3 \text{ mm}$$

Conociendo la profundidad del eje neutro, se determina nuevamente el esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo, a partir, de un equilibrio estático de fuerzas horizontales:

$$f_f = E_f \varepsilon_{mu} \left(\frac{d - c}{c} \right)$$

$$f_f = (62100)(0.0025) \left(\frac{95 - 15.3}{15.3} \right)$$

$$f_f = 809 \text{ MPa}$$

Como se puede observar el valor del esfuerzo asumido inicialmente tan solo es de aproximadamente el 60% del valor obtenido del análisis de resistencia última, se debe continuar repitiendo el procedimiento hasta que el esfuerzo inicial sea igual al determinado en la última ecuación.

Realizando nuevamente el ciclo de iteración con los siguientes datos:

$$f_f = 604 \text{ MPa}$$

$$a = 15.5 \text{ mm}$$

$$c = 19.4 \text{ mm}$$

$$f_f = 604 \text{ MPa}$$

De esta manera se puede observar que el valor en el que converge el proceso de iteración para el muro en análisis es con un esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo de 604 MPa.

Conociendo la magnitud del esfuerzo en las barras de refuerzo es posible determinar el momento nominal a la falla del muro:

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$M_n = (253) (604) \left(95 - \frac{15.5}{2} \right)$$

$$M_n = 13.4 \text{ kN} - \text{m}$$

- **Longitud de traslapo**

El cálculo de longitud de desarrollo de las barras de GFRP se muestra a continuación, que como ya se mencionó es tomada del ACI 440.1R-15:

$$l_d = \frac{(1) \frac{87536}{\sqrt{1500}} - 340}{13.6 + \frac{3.74}{0.5}} (0.5)$$

$$l_d = 46 \text{ in} = 1.15 \text{ m}$$

A continuación, se presenta la tabla de resumen de las capacidades teóricas de cada uno de los muros que componen el programa experimental en la Tabla 3 y en la Tabla 4 se presentan las longitudes de desarrollo requeridas tomando como base la Ecuación 6.

Muro	Refuerzo	As mm ²	b mm	d mm	ρ %	ρ_{fb} %	ρ/ρ_{fb}	ϵ_f %	M_n kN-m	f_r MPa
4-1500-C-C 4-1500-C-T-1.15-A 4-1500-C-T-1.15-B	2#4	253	1190	95	0.22	0.06	3.59	0.97	13.35	604
5-1500-C-C 5-1500-C-T-0.94-A 5-1500-C-T-0.94-B 5-1500-C-T-1.06-A 5-1500-C-T-1.06-B 5-1500-C-T-1.18-A 5-1500-C-T-1.18-B 5-1500-C-T-1.18-C	2#5	396	1190	95	0.35	0.07	4.84	0.76	15.91	469
5-2500-C-C 5-2500-C-T-1.23-A 5-2500-C-T-1.23-B	2#5	396	1190	95	0.35	0.13	2.74	1.01	21.67	626
6-1500-C-C 6-1500-C-T-1.35-A 6-1500-C-T-1.35-B	2#6	570	1590	95	0.38	0.08	4.75	0.72	21.87	450
5-1500-D-C 5-1500-D-T-1.18	2#5	396	1190	95	0.35	0.07	4.84	1.03	38.42	639
6-1500-D-C 6-1500-D-T-1.35	2#6	570	1590	95	0.38	0.08	4.75	0.99	52.93	613

Tabla 3. Resumen de la capacidad teórica de los muros

Refuerzo	f'm psi	fr psi	c in	la in	la m
#4	1500	87529	3.74	46	1.15
#5	1500	68062	3.74	47	1.18
	2500	90728	3.74	49	1.23
#6	1500	65209	3.74	54	1.35

Tabla 4. Resumen de la longitud de desarrollo

6.1. Protocolo de carga

Teniendo en cuenta las capacidades teóricas de los muros se definió el protocolo de carga para llevar a cabo la toma de datos experimentales del comportamiento de cada uno de ellos. Este protocolo se definió de tal manera que permita evidenciar propiedades específicas del refuerzo, cambios de rigidez en el espécimen, entre otros. Para el desarrollo de cada uno de los ensayos se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento:

- a. Cargar el muro hasta el 20% de la capacidad máxima esperada.
- b. Descargar el muro hasta aproximadamente una carga de 300 kg.
- c. Cargar el muro hasta el 40% de la capacidad máxima esperada.
- d. Descargar el muro hasta aproximadamente una carga de 300 kg.
- e. Cargar el muro hasta el 70% de la capacidad máxima esperada.
- f. Descargar el muro hasta aproximadamente una carga de 300 kg.
- g. Cargar el muro hasta el 90% de la capacidad máxima del muro.
- h. Descargar el muro hasta aproximadamente una carga de 300 kg.
- i. Cargar el muro hasta que se presente la falla

Los resultados experimentales obtenidos de cada uno de los especímenes de ensayo se presentan en el siguiente capítulo,

7. Resultados y análisis

7.1. Modos de falla

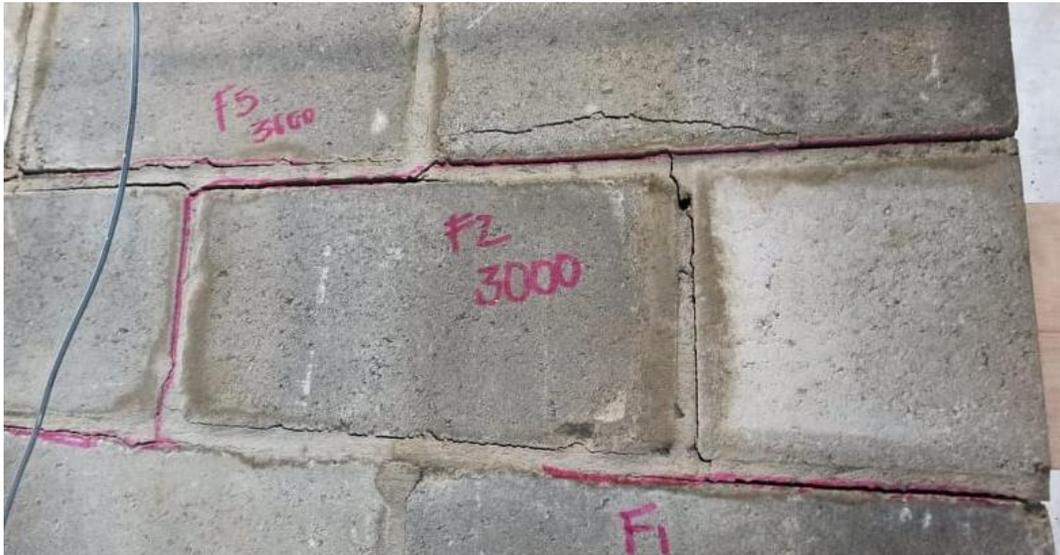
Para el montaje de ensayo dispuesto para el desarrollo del programa experimental, se dispuso de una serie de equipos transductores de desplazamiento lineal (LVDT), que, por medio de un equipo de adquisición de datos, permitió medir las deflexiones al centro de la altura del muro. Los desplazamientos de cada uno de los muros fueron ajustados, teniendo en cuenta la lectura dada en los LVDT ubicados en los apoyos del marco, en los casos en que estos llegaron a desplazarse. El montaje puede observarse en la Foto 5.



Foto 5. LVDT ubicado en el apoyo superior para medir desplazamientos del perfil de apoyo.

El patrón de fisuramiento en general fue similar, iniciando con pequeñas fisuras entre las unidades de mampostería y el mortero de pega en la zona de tensión, lo cual generó una pérdida de rigidez en los muros, debido a que las aberturas entre los dos componentes cada vez eran más grandes. A mayores cargas inducidas en los especímenes de ensayo se continuaron prolongando las fisuras en las unidades de

mampostería y finalmente se presentaron fallas repentinas por aplastamiento tanto en las unidades de mampostería como en el mortero de pega.



(a)



(b)



(c)

Foto 6. Patrones de falla. (a) Fisuras paralelas entre las unidades de mampostería y el mortero de pega. (b) Aumento de la separación de las unidades de mampostería y mortero de pega. (c) Falla por aplastamiento zona de compresión.

Un punto importante por resaltar en uno de los modos de falla presentado por el espécimen 5-2500-C-T-1.23B, que presentó una falla explosiva de, tanto de la unidad de mampostería como del mortero de relleno, en la zona central sometida a esfuerzos de tensión.



Foto 7. Falla explosiva del muro 5-2500-C-T-1.23B

En la Foto 7, se observa el modo de falla que presentó el muro reforzado con barras #5. En esta, se observa que la celda en la que se presenta la pérdida de material, se ubica justamente el extremo de una de las barras de refuerzo, infiriendo que posiblemente se haya generado una concentración de esfuerzos en este punto. Por otra parte, en la foto se evidencia el cuidado durante el proceso constructivo, para garantizar que las barras de refuerzo se ubicaran justo en la mitad de la celda, esto fue posible gracias a la utilización de los centralizadores.



Foto 8. Posición de la barra de refuerzo dentro de la celda.

Después de llevar a cabo cada uno de los ensayos a flexión de los muros se procede a realizar la respectiva verificación de la ubicación de las barras dentro de las celdas, como se observa en la Foto 8.

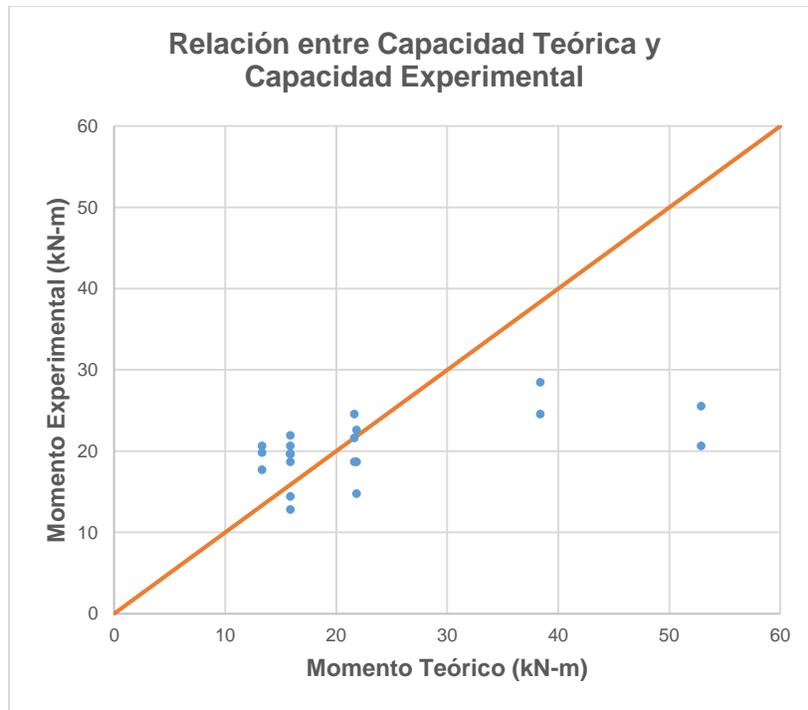
En la Tabla 5, se muestra el resumen del programa experimental. El modo de falla de todos los muros fue debido al aplastamiento de las unidades de mampostería y en algunos casos, también del mortero de pega, tal y como se dedujo de manera teórica en el capítulo 6.

Así mismo, es posible establecer que existe una relación adecuada entre los resultados experimentales y las capacidades teóricas, siempre y cuando la barra de refuerzo se encuentre ubicada justo en la mitad de la celda. Además, se puede concluir que esta aproximación es proporcional al diámetro de la barra de GFRP.

Muro	Longitud Horizontal cm	Refuerzo	M _{teo} kN-m	M _{exp} kN-m	M _{teo} / M _{exp}	P _{falla} kN	Modo de falla
4-1500-C-C	119	2#4	13.3	20.6	0.6	61.8	Aplastamiento
4-1500-C-T-1.15-A	119	2#4	13.3	19.8	0.7	59.4	Aplastamiento
4-1500-C-T-1.15-B	119	2#4	13.3	17.7	0.8	53.0	Aplastamiento
5-1500-C-C	119	2#5	15.9	19.6	0.8	58.9	Aplastamiento
5-1500-C-T-0.94-A	119	2#5	15.9	14.4	1.1	43.2	Aplastamiento
5-1500-C-T-0.94-B	119	2#5	15.9	19.6	0.8	58.9	Aplastamiento
5-1500-C-T-1.06-A	119	2#5	15.9	19.6	0.8	58.9	Aplastamiento
5-1500-C-T-1.06-B	119	2#5	15.9	12.8	1.2	38.3	Aplastamiento
5-1500-C-T-1.18-A	119	2#5	15.9	21.9	0.7	65.7	Aplastamiento
5-1500-C-T-1.18-B	119	2#5	15.9	20.6	0.8	61.8	Aplastamiento
5-1500-C-T-1.18-C	119	2#5	15.9	18.6	0.9	55.9	Aplastamiento
5-2500-C-C	119	2#5	21.7	21.6	1.0	64.7	Aplastamiento
5-2500-C-T-1.23-A	119	2#5	21.7	18.6	1.2	55.9	Aplastamiento
5-2500-C-T-1.23-B	119	2#5	21.7	24.5	0.9	73.6	Aplastamiento
6-1500-C-C	159	2#6	21.9	22.6	1.0	67.7	Aplastamiento
6-1500-C-T-1.35-A	159	2#6	21.9	18.6	1.2	55.9	Aplastamiento
6-1500-C-T-1.35-B	159	2#6	21.9	14.7	1.5	44.1	Aplastamiento
5-1500-D-C	119	2#5	38.4	24.5	1.6	73.6	Aplastamiento
5-1500-D-T-1.18	119	2#5	38.4	28.4	1.4	85.3	Aplastamiento
6-1500-D-C	159	2#6	52.9	25.5	2.1	76.5	Aplastamiento
6-1500-D-T-1.35	159	2#6	52.9	20.6	2.6	61.8	Aplastamiento

Tabla 5. Resumen experimental

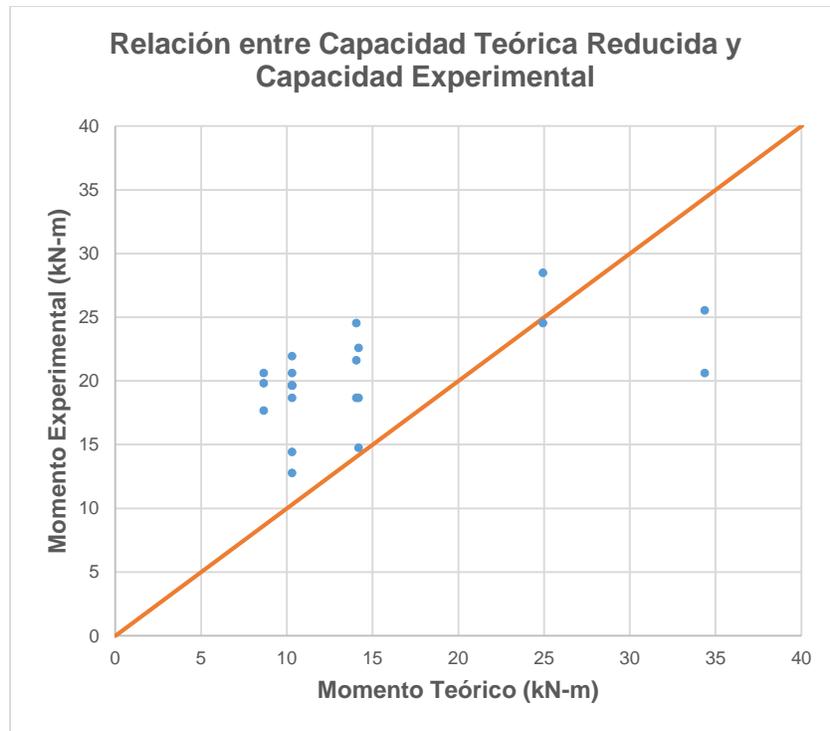
La pertinencia de la ecuación para establecer la capacidad a flexión fuera del plano de muros de mampostería de concreto se realiza en función de una gráfica en la cual se relaciona los resultados experimentales con los cálculos teóricos. (Otálora, 2017; Quintana Ruiz, 2017)



Gráfica 3. Relación entre capacidad teórica y experimental del programa experimental

En la Gráfica 3, se observa que, los puntos de análisis que se encuentran por encima de la línea de referencia indican que el momento experimental es mayor a la capacidad teórica del muro, lo cual es ideal.

En la Tabla 5, los valores que se encuentran de color rojo son aquellos que presentan capacidades menores a las determinadas de manera teórica. Sin embargo, es importante tener presente que, de acuerdo con las especificaciones dadas por el ACI 440-1R-15, el factor de reducción de capacidad de carga ϕ para una sección de concreto, cuya falla se encuentra controlada por compresión es igual a 0.65. Teniendo en cuenta lo establecido en la norma de diseño, la capacidad teórica de los muros del programa experimental se reduce obteniendo la siguiente relación:



Gráfica 4. Relación entre capacidad teórica reducida y capacidad experimental del programa experimental.

De la Gráfica 4, es posible validar el ajuste a las ecuaciones propuestas por (Otálora, 2017; Quintana Ruiz, 2017) que permiten evaluar la capacidad de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP.

Por otra parte, también se puede observar que, únicamente 2 de los muros no cumplen con el criterio de capacidad de diseño reducida. Estos muros corresponden a los que tienen una mayor relación M_{teo}/M_{exp} (Tabla 5), es decir, los muros 6-1500-D en los cuales la barra de refuerzo se encuentra desplazada respecto al eje de la celda.

Teniendo en cuenta lo anterior, es posible determinar que el aumento de la profundidad efectiva “d”, con la cual se evalúa la capacidad a flexión fuera del plano de los muros reforzados con barras de GFRP, no predice realmente la capacidad del muro, por tanto, se recomienda asumir que la barra de refuerzo está ubicada siempre en la mitad de la celda de la unidad de mampostería.

De acuerdo con lo anterior, se determina que para el muro reforzado con barras #6 desplazada se tuvo un aumento en la capacidad de tan solo el 13% comparado con el muro que tenía la barra ubicada justo en la mitad de la celda. Respecto al muro reforzado con las barras #5 desplazadas del centro de la celda, este aumento fue del 25%. A pesar de que, los muros con las barras desplazadas presentan un aumento en

su capacidad, esta no es representativa, ya que, de manera teórica se espera que este sea de aproximadamente el 150%.

7.2. Determinación del modelo matemático para predecir la longitud de desarrollo de barras GFRP

Para la determinación del modelo matemático que permita evaluar la longitud de traslapo mínimo para las barras de GFRP utilizadas como refuerzo interno en muros de mampostería de concreto sometida a cargas fuera del plano, se plantea un análisis similar al desarrollado en el documento ACI 440.1R-15; para ello, es necesario evaluar la capacidad de adherencia entre la barra de FRP y el grout.



Figura 10. Transferencia de esfuerzo para las barras de refuerzo (Nanni et al., 2014)

En la Figura 10, se muestra la condición de equilibrio de una barra de refuerzo que presenta una longitud embebida “ l_e ”. La fuerza total de tensión inducida en la barra es soportada por un esfuerzo de adherencia desarrollado entre el grout y la superficie de la barra. El equilibrio estático de fuerzas en el sistema es:

$$u \pi d l_e = A_f f_{fu}$$

Ecuación 11. Equilibrio de fuerzas en una barra de refuerzo

Donde:

u	=	esfuerzo de adherencia (psi)
d	=	diámetro de la barra de refuerzo (in)
l_e	=	longitud embebida (in)
A_f	=	área del refuerzo (in ²)
f_f	=	esfuerzo de tensión en la barra de refuerzo (psi)

La ecuación establecida en el ACI 440.1R-15 para evaluar la longitud mínima de traslapo en elementos de concreto, está en función de las siguientes variables:

- Esfuerzo de adherencia

- Recubrimiento de la barra de refuerzo
- Longitud embebida
- Diámetro de la barra

El modelo matemático que se encuentra establecido en ACI 440.1R-15, se definió a partir de una serie de resultados experimentales que fueron ajustados a una regresión lineal múltiple, en función de la correlación entre las variables mencionadas anteriormente. A continuación, se expresa la ecuación establecida por la guía de diseño:

$$\alpha \frac{u}{\sqrt{f'_c}} = 4.0 + 3.0 \frac{C}{d_b} + 100 \frac{d_b}{l_e}$$

Ecuación 12. Esfuerzo de adherencia normalizada ACI 440.1R-15

Donde:

- u = esfuerzo de adherencia (psi)
- α = factor de posición de la barra
- f'_c = resistencia a la compresión (psi)
- C = recubrimiento mínimo al centro de la barra de refuerzo (in)
- d_b = diámetro de la barra de refuerzo (in)
- l_e = longitud embebida (in)

Siguiendo un procedimiento similar al propuesto por el ACI, se calculó el esfuerzo de adherencia u , de acuerdo con la Ecuación 11. El procedimiento para calcular la magnitud de este esfuerzo se describe a continuación:

Muro 4-1500-C-T-1.15-A

- **Momento experimental**

$$M_{exp} = 175098 \text{ lb} - \text{in}$$

- **Cálculo de la altura del bloque de compresiones “a”**

$$M_n = \beta f'_m b a \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$a = 0.95 \text{ in}$$

- **Cálculo del esfuerzo de tensión máximo en la barra de refuerzo**

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$f_f = 136661 \text{ psi}$$

- **Esfuerzo de adherencia “u”**

$$u = \frac{\alpha A_f f_f}{\pi d l_e}$$

$$u = 742.7 \text{ psi}$$

La magnitud del factor de posición de la barra “ α ”, fue tomado con un valor de 0.8, lo cual permitió tener una mayor correlación en las variables de estudio.

A continuación, se muestra la tabla de resumen, con los resultados experimentales del esfuerzo de adherencia desarrollado en las barras de refuerzo para cada espécimen de ensayo, y que fueron la base con la cual se realizó la regresión lineal múltiple para obtener los coeficientes de correlación entre las variables de estudio:

	$\alpha \frac{u}{\sqrt{f'm}}$	$\frac{C}{d_b}$	$\frac{d_b}{l_e}$
4-1500-C-T-1.15-A	15.34	7.48	0.011
4-1500-C-T-1.15-B	13.45	7.48	0.011
5-1500-C-T-0.94-A	10.46	5.98	0.017
5-1500-C-T-0.94-B	14.87	5.98	0.017
5-1500-C-T-1.06-A	13.19	5.98	0.015
5-1500-C-T-1.06-B	8.12	5.98	0.015
5-1500-C-T-1.18-A	13.50	5.98	0.013
5-1500-C-T-1.18-B	12.55	5.98	0.013
5-1500-C-T-1.18-C	11.16	5.98	0.013
5-2500-C-T-1.23-A	7.83	5.98	0.013
5-2500-C-T-1.23-B	10.58	5.98	0.013
6-1500-C-T-1.35-A	7.83	4.99	0.014
6-1500-C-T-1.35-B	6.06	4.99	0.014
5-1500-D-T-1.18	9.18	1.60	0.013
6-1500-D-T-1.35	4.71	1.33	0.014

Tabla 6. Variables para determinar la longitud mínima de traslapo

Las unidades que se manejan para la determinación de cada una de las variables son en el sistema inglés (*fuerza = lb y longitud = in*).

Utilizando la herramienta de Excel, se realiza una regresión lineal múltiple, obteniendo los siguientes coeficientes de correlación entre las variables:

$$\alpha \frac{u}{\sqrt{f'm}} = 1.34 \frac{C}{d_b} + 237 \frac{d_b}{l_e}$$

Ecuación 13. Regresión lineal múltiple para evaluar esfuerzo de adherencia

A continuación, se muestran los resultados del análisis de la regresión, de los cuales es importante observar que el valor ajustado del R² obtenido de la regresión lineal múltiple es igual al 87%, lo que indica que si existe una correlación entre las variables estudiadas.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.976
Coefficiente de determinación R ²	0.953
R ² ajustado	0.872
Error típico	2.578
Observaciones	15

Tabla 7. Estadísticas de la regresión.

Una vez establecidos los coeficientes que permiten evaluar el esfuerzo de adherencia desarrollado entre las barras de refuerzo y el grout, se realiza una validación de la ecuación obtenida con los resultados del programa experimental. Para ello, se reemplaza la Ecuación 11 en la Ecuación 13.

$$\alpha \left(\frac{1}{\sqrt{f'_m}} \right) \left(\frac{A_f f_f}{\pi d_b l_e} \right) = 1.34 \frac{C}{d_b} + 237 \frac{d_b}{l_e}$$

$$\alpha \left(\frac{1}{\sqrt{f'_m}} \right) \left(\frac{d_b f_f}{4 l_e} \right) = 1.34 \frac{C}{d_b} + 237 \frac{d_b}{l_e}$$

$$f_f = \frac{\sqrt{f'_m}}{\alpha} \left(5.36 \frac{C}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 950 \right)$$

Realizando la validación de la ecuación propuesta, se estableció que era necesario una disminución del 70% del factor C/d_b , para obtener una mejor aproximación con los resultados experimentales. Teniendo en cuenta lo anterior, la ecuación que permite definir el esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo de FRP es:

$$f_f = \frac{\sqrt{f'_m}}{\alpha} \left(1.60 \frac{C}{d_b} \frac{l_e}{d_b} + 950 \right)$$

Ecuación 14. Modelo matemático experimental para determinar el esfuerzo de tensión en las barras de refuerzo de FRP traslapadas en muros de mampostería

A continuación, se presenta la validación de la ecuación planteada con el ajuste propuesto:

	f_f ecuación	f_f exp	Error
	psi	psi	%
4-1500-C-T-1.15	99296	119818	17
5-1500-C-T-0.94	73877	73761	0
5-1500-C-T-1.06	77437	69977	11
5-1500-C-T-1.18	80997	90684	11
5-2500-C-T-1.23	106481	90580	18
6-1500-C-T-1.35	73803	48413	
5-1500-D-T-1.18	55351	67121	18
6-1500-D-T-1.35	53428	32823	
	Promedio		12

Tabla 8. Validación de la pertinencia de la ecuación planteada.

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 8, la Ecuación 14 presenta un error porcentual promedio del 12% comparada con los resultados experimentales, lo cual representa una buena aproximación entre los valores teóricos y experimentales.

Finalmente, la Ecuación 14 se despeja en función de la longitud de desarrollo obteniendo el siguiente modelo matemático:

$$l_d = \frac{\alpha \frac{f_f}{\sqrt{f'_m}} - 950}{1.60 \frac{C}{d_b}} d_b$$

Ecuación 15. Expresión matemática que permite evaluar el traslape mínimo de las barras de GFRP en muros de mampostería de concreto ante cargas fuera del plano.

7.3. Comparación del modelo matemático planteado con las ecuaciones establecidas en las guías de diseño

A continuación, se presenta una comparación del modelo matemático obtenido del programa experimental desarrollado y las ecuaciones planteadas en las guías de diseño de Estados Unidos y Canadá descritas en el Marco de referencia; así como también, con el modelo matemático establecido en una de las investigaciones referenciadas en el estado del arte (Basaran & Kalkan, 2020).

Los modelos matemáticos comparados determinan la longitud de desarrollo de barras de FRP utilizadas como refuerzo interno de elementos de concreto, por lo tanto, para llevar a cabo esta comparación, en lugar de utilizar un valor de resistencia a la

compresión del concreto, se determina en función de la resistencia a la compresión del murete.

Es importante resaltar que, dos de estos modelos matemáticos (CSA S6-14 y (Basaran & Kalkan, 2020)) están planteados en función del módulo de rotura del concreto, sin embargo, al realizar el cambio de variable entre el módulo de rotura del concreto y el módulo de rotura de la mampostería, no se obtienen valores positivos de la longitud de desarrollo. Por tal motivo, no se tienen en el comparativo.

Ecuación	l_d (cm)			
	f'_m (Mpa)	#4	#5	#6
Propuesta	10.4	92	76	95
	17.3	97	84	106
ACI 440.1R-15	10.4	115	118	135
	17.3	119	120	143
CSA S806-12	10.4	47	53	97
	17.3	48	55	100

Tabla 9. Cuadro comparativo del modelo matemático propuesto y las ecuaciones establecidas en las guías de diseño.

En la Tabla 9, puede observarse el cálculo de la longitud de desarrollo para el modelo matemático propuesto y las ecuaciones de las guías de diseño de Estados Unidos y Canadá.

De los resultados obtenidos puede observarse que, con la ecuación propuesta, la longitud de desarrollo, para especímenes con las mismas propiedades mecánicas y características geométricas, tiende a ser menor cuando la cuantía de refuerzo aumenta, debido a que el esfuerzo de tensión desarrollado en las barras de refuerzo #5 es de aproximadamente el 60% respecto a las barras #4. Este comportamiento es contrario a los resultados obtenidos del programa experimental de otros investigadores (Eltantawi et al., 2022)

Por otra parte, se observa que la ecuación propuesta por el ACI 440.1R-15, presenta valores muy conservadores, así como lo concluye (Basaran & Kalkan, 2020), encontrándose dentro un rango de 1.25 y 1.60 veces el valor determinado por la ecuación propuesta. Esta reducción en la longitud de desarrollo mínima requerida, evaluada con el modelo matemático propuesto, puede deberse, en cierta medida, al confinamiento generado por las unidades de mampostería, lo cual mejora el comportamiento mecánico del refuerzo.

Finalmente, la ecuación propuesta por el CSA S806-12, subestima los valores de longitud de desarrollo para los diámetros de barras de refuerzo #4 y #5, mientras que, tiene para las barras #6 son prácticamente la misma.

Además, es importante realizar un comparativo entre las longitudes de desarrollo que se establecen con la ecuación obtenida del programa experimental y la longitud de desarrollo requerida de barras de acero estructural utilizadas convencionalmente como reforzamiento de muros de mampostería.

De acuerdo con el documento de la NSR-10, el modelo matemático para definir la longitud de desarrollo en barras de acero embebidas en mortero de relleno, se muestra a continuación:

$$l_d = \frac{1.5 d_b^2 f_y}{K \sqrt{f'_m}}$$

Ecuación 16. Longitud de desarrollo de barras de acero embebidas en mortero de relleno.

Los resultados evaluados con la ecuación propuesta de la investigación y la ecuación del documento de la NSR-10, para un esfuerzo máximo igual a 420 MPa, definido como el esfuerzo de fluencia, se resumen en la siguiente tabla:

	ld (cm)			
	f'm (MPa)	#4	#5	#6
Ecuación ajustada para barras de FRP?	10.4	31	48	69
NSR-10	10.4	50	62	74

Tabla 10. Comparativo del modelo matemático propuesto y la ecuación del documento de la NSR-10

Como se observa en la Tabla 10, la longitud de desarrollo evaluada con el modelo matemático propuesto es menor a la obtenida con la ecuación que establece la longitud de desarrollo de barras de acero embebidas en mortero de relleno, lo cual conlleva a una reducción en la utilización del material de refuerzo. Esta variación se encuentra dentro de un rango del 60% y del 90%, para barras #4 y #6, respectivamente. Como se observa, esta diferencia entre las longitudes de desarrollo, disminuye para barras de refuerzo de diámetro mayor.

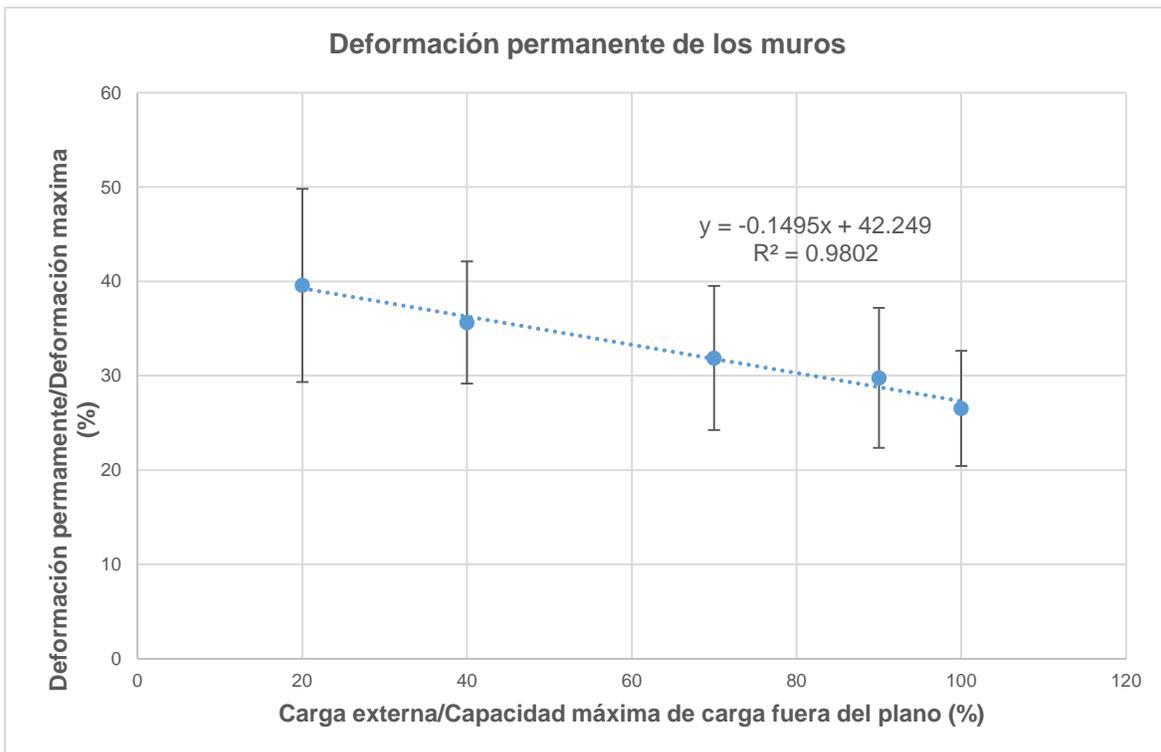
Además, con el fin de complementar el análisis de los resultados, se evaluó el desempeño de los muros teniendo en cuenta los resultados experimentales. Para ello se evalúan factores como: relación entre capacidad teórica y experimental,

deformación permanente en los muros, módulo de elasticidad de la mampostería para cargas por fuera del plano e influencia del traslapo en el comportamiento mecánico.

7.4. Deformación permanente de los especímenes de ensayo

El protocolo de carga para el ensayo permitió evidenciar claramente el comportamiento elástico de las barras de GFRP, utilizadas como refuerzo interno de los especímenes, ya que, durante el proceso de descarga en cada uno de los ciclos, estos tendían a recuperar un porcentaje de la deformación máxima alcanzada.

Por ejemplo, para el muro 4-1500-C-C, el porcentaje de deformación permanente varió de un 55% para el primer ciclo hasta un 22% en el ciclo de falla del muro, respecto a la deformación máxima desarrollada (la deformación permanente para los ciclos de carga y descarga en los que no llevaba a cero la fuerza externa, se proyectó en función de una relación lineal).



Gráfica 5. Deformación permanente de los muros

Teniendo en cuenta la Gráfica 5, se puede definir una relación lineal que permita predecir la deformación permanente, como un porcentaje de la deformación máxima desarrollada, de un muro sometido a cargas fuera del plano, en función de la relación

entre la carga inducida y su capacidad máxima resistente. La ecuación que define esta deformación permanente es:

$$y = -0.15 x + 42$$

Ecuación 17. Deformación permanente de muros sometidos a carga fuera del plano

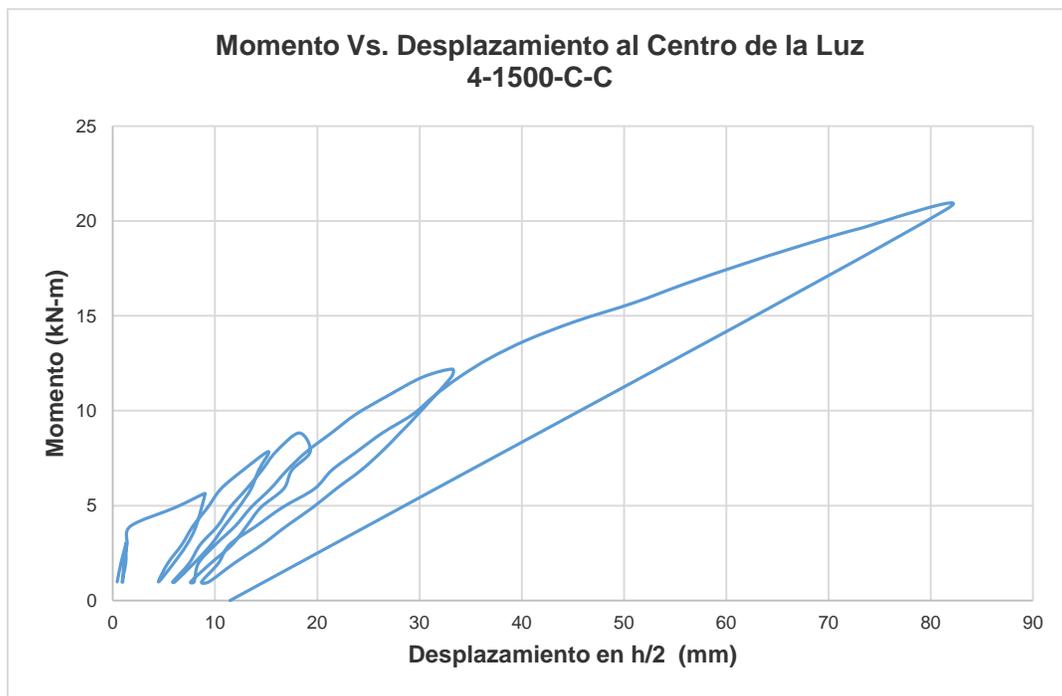
Donde:

y = Deformación permanente / deformación máxima experimentada (%)

x = Carga externa / capacidad máxima de carga (%)

7.5. Comportamiento mecánico de los muros de mampostería de concreto

Del protocolo de cargas para cada uno de los ensayos realizados se puede obtener la siguiente gráfica:

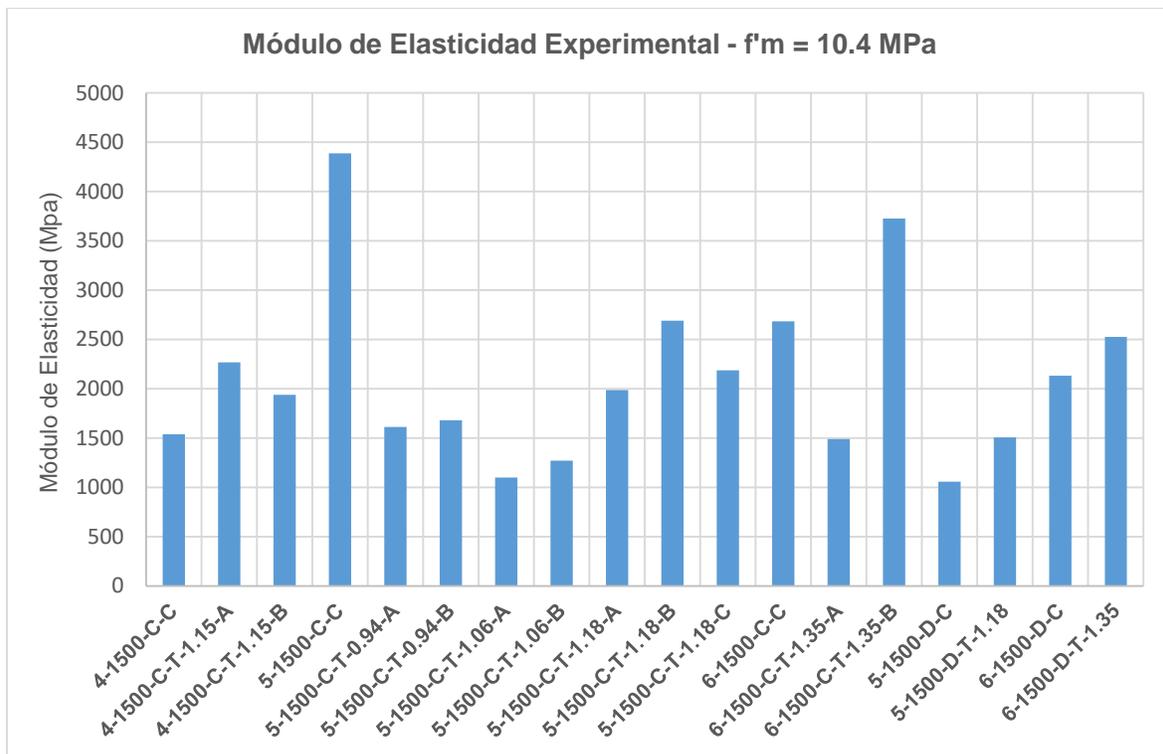


Gráfica 6. Curva de momento vs. Desplazamiento al centro de luz del muro 4-1500-C-C

De la Gráfica 6, es posible evaluar la variación de deflexiones al centro de la altura del muro respecto al momento interno máximo de la sección. En esta se observa

el comportamiento experimental del muro 4-1500-C-C; de esta se observan dos comportamientos bien definidos, en la primera parte una variación elástica-lineal en función de la rigidez total de la sección, hasta llegar al momento de agrietamiento de la sección, en la cual la pendiente empieza a disminuir progresivamente debido al aumento de las fisuras, y además, a la separación entre el mortero de pega y las unidades de mampostería en la zona de tensión, lo cual genera una pérdida de rigidez mientras la carga externa aumenta. El comportamiento mecánico de los muros es similar al encontrado en las investigaciones desarrolladas en la Escuela Colombiana de Ingeniería (Otálora, 2017; Quintana Ruiz, 2017; Urbina Gomez, 2020)

Teniendo en cuenta, la variación lineal entre la segunda derivada de la deflexión y el momento interno en la sección es posible determinar el módulo de elasticidad de cada uno de los muros ensayados. El análisis de los datos obtenidos se divide en dos, agrupándolos en función de la resistencia a la compresión del murete, es decir, uno para la resistencia de 10.4 MPa y otro para 17.3 MPa.



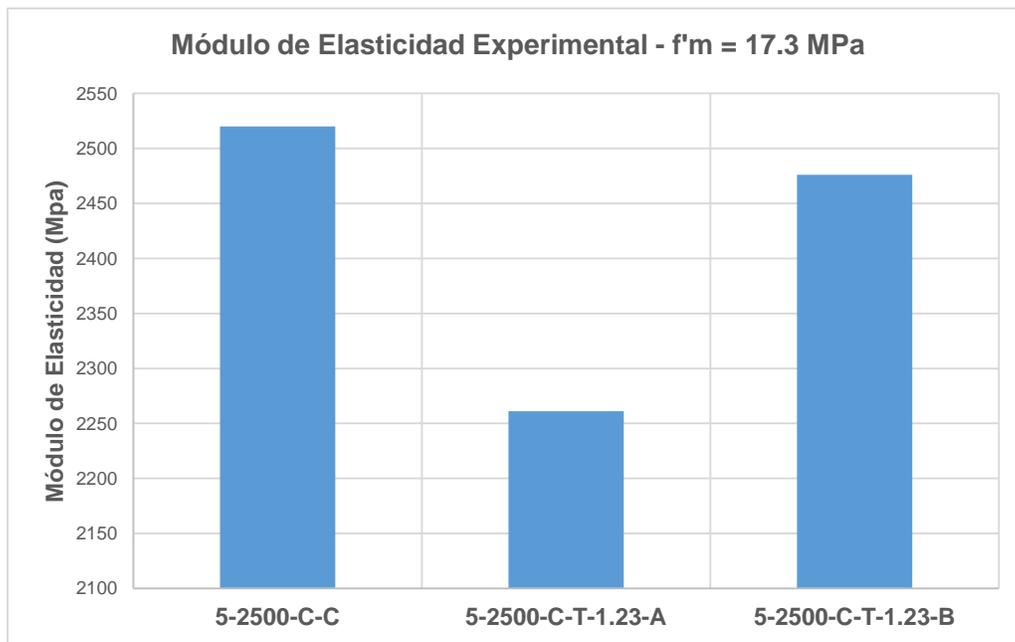
Gráfica 7. Módulo de elasticidad experimental – $f'_m = 10.4 \text{ MPa}$.

Para los datos experimentales de los muros con una resistencia a la compresión de 10.4 MPa, que corresponde aproximadamente al 85% del programa experimental, se tuvieron en cuenta únicamente aquellos módulos de elasticidad con los cuales se

podiera obtener la menor desviación estándar. Como se puede observar en la Gráfica 7, existen algunos valores que se encuentran muy por encima, y otros, muy por debajo del valor promedio. Para la evaluación del módulo de elasticidad se tuvo en cuenta el 67% de los resultados experimentales obteniendo una desviación estándar de aproximadamente el 21%.

Para este caso, el módulo de elasticidad del muro sometido a cargas por fuera del plano es igual a:

$$E_{exp} = 1844 \text{ MPa}$$



Gráfica 8. Módulo de elasticidad experimental – $f'm = 17.3 \text{ MPa}$.

Para el segundo caso, tan solo se tienen tres datos experimentales. Como se puede observar en la Gráfica 8, los valores están muy cercanos al promedio obtenido. Para la evaluación del módulo de elasticidad se obtuvo una desviación estándar de aproximadamente el 6%.

Para este caso, el módulo de elasticidad del muro sometido a cargas por fuera del plano es igual a:

$$E_{exp} = 2419 \text{ MPa}$$

A partir de los dos resultados experimentales, se plantea un modelo matemático para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería de concreto reforzada internamente con barras de GFRP y sometida a cargas por fuera del plano:

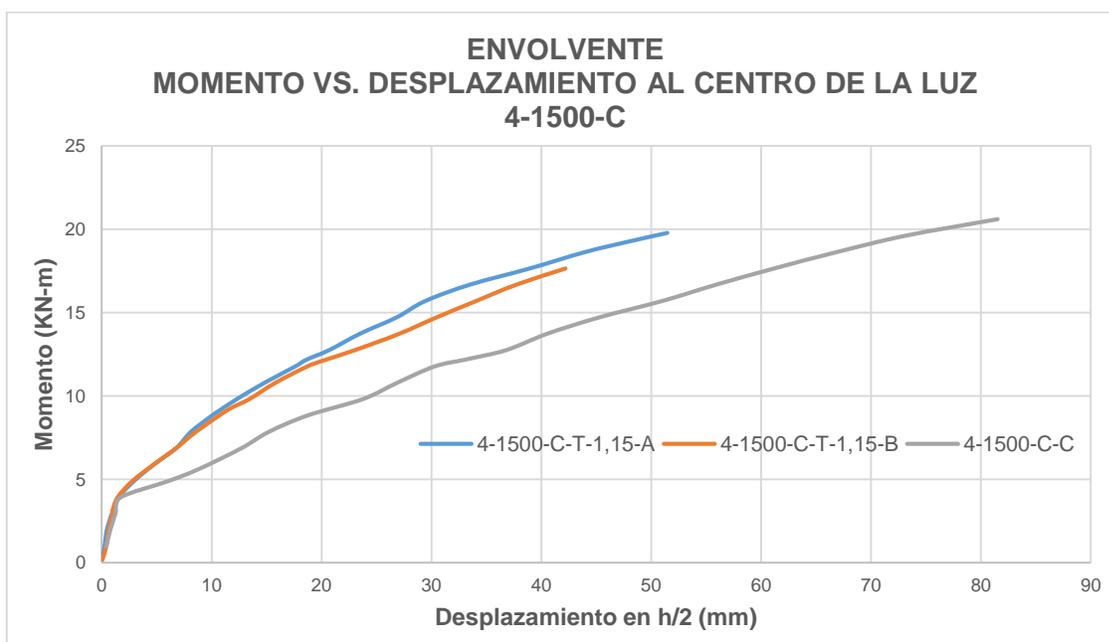
$$E = 580 \sqrt{f'm}$$

Ecuación 18. Modelo matemático para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería sometida a cargas por fuera del plano.

Es importante aclarar que, los resultados obtenidos de la determinación del módulo de elasticidad de la mampostería sometida a cargas fuera del plano, no puede compararse con la ecuación definida en la Norma Sismo Resistente NRS – 10, ya que, esta ecuación es válida para esfuerzos de compresión.

7.6. Evaluación de la influencia del traslapo en el comportamiento mecánico de los muros de mampostería de concreto

De los ensayos realizados, es pertinente comparar el comportamiento de aquellos muros, que, en teoría, deben tener la misma capacidad máxima de carga. Para ellos, se muestra a continuación, las envolventes de los muros 4-1500-C.



Gráfica 9. Envolvente momento vs desplazamiento al centro de la luz – Muro 4-1500-C

En la Gráfica 9, se traspone el comportamiento tanto del muro con las barras de refuerzo continúa, como las barras traslapadas. Del comportamiento de los muros se observa que, la primera pendiente de la variación del momento y el desplazamiento es prácticamente la misma, ya que, antes de llegar al momento de agrietamiento la rigidez del muro está en función de la sección total. En los tres casos, esta rigidez es

exactamente la misma, ya que, al presentar un comportamiento lineal-elástico, el eje neutro de la sección se encuentra ubicado en la mitad de su espesor, justo donde están ubicadas las barras de refuerzo. En la investigación desarrollada por (Eltantawi et al., 2022), los autores observaron un comportamiento lineal hasta la formación de la primera fisura, independientemente de la textura de la superficie de la barra de refuerzo, la longitud del empalme o el diámetro de la barra.

Sin embargo, después de alcanzar el momento de agrietamiento, la pendiente de la variación de la deformación respecto al momento máximo interno es mayor para los muros que se encuentran traslapados, esto debido a la presencia de las dos barras de refuerzo en la zona sometida a flexión pura. Por otra parte, a pesar de presentar mayores deformaciones al centro de la luz el muro que tiene las barras continuas, su capacidad máxima de momento es un tanto mayor que los muros con las barras traslapadas. La variación experimental es de aproximadamente el 9%.

Para los muros que presentan otras características de refuerzo, se evidencia un comportamiento similar; las envolventes de estos se encuentran en el anexo C.

Muro	$M_{control}$ kN-m	M_{exp} kN-m	$M_{control} / M_{exp}$
4-1500-C-T-1.15-A	20.6	19.8	1.0
4-1500-C-T-1.15-B		17.7	1.2
5-1500-C-T-0.94-A	19.6	14.4	1.4
5-1500-C-T-0.94-B		19.6	1.0
5-1500-C-T-1.06-A		19.6	1.0
5-1500-C-T-1.06-B		12.8	1.5
5-1500-C-T-1.18-A		21.9	0.9
5-1500-C-T-1.18-B		20.6	1.0
5-1500-C-T-1.18-C		18.6	1.1
5-2500-C-T-1.23-A		21.6	18.6
5-2500-C-T-1.23-B	24.5		0.9
6-1500-C-T-1.35-A	22.6	18.6	1.2
6-1500-C-T-1.35-B		14.7	1.5
5-1500-D-T-1.18	24.5	28.4	0.9
6-1500-D-T-1.35	25.5	20.6	1.2
Promedio			1.1

Tabla 11. Comparación entre capacidad del muro control y los muros con el refuerzo traslapado.

En la Tabla 11, se muestra el resumen del programa experimental, teniendo en cuenta el momento máximo de los muros control, que son aquellos que presentan las barras de refuerzo continua, respecto a los muros con las barras traslapadas. De la tabla se observan algunos resultados en color rojo, que son aquellos muros que

presentan una mayor capacidad respecto al muro control; en teoría se espera que la capacidad del muro sea un poco inferior o igual a la capacidad de diseño. Sin embargo, en promedio, la capacidad de los muros control tiene un 10% más de capacidad de resistencia a momento de flexión.

8. Conclusiones y recomendaciones

- De acuerdo con las especificaciones dadas en el ACI 440-1R-15, el factor de reducción de capacidad de carga ϕ para una sección sometida a esfuerzos normales debido a la flexión, es mayor cuando la sección está controlada por una falla debido al aplastamiento en la zona de compresión. De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en este proyecto, se puede concluir que realizar un diseño controlado por el aplastamiento es conveniente, ya que, el tipo de falla (aplastamiento o rotura de las barras de refuerzo) no representan un cambio significativo en la deformación máxima alcanzada de este.
- Cuando una estructura de mampostería de concreto que se encuentra reforzada internamente con barras de GFRP, y esta se ve afectada debido al aumento de una carga por fuera del plano que genera flexión por fuera del plano principal del muro, es posible realizar las reparaciones pertinentes en aquellas unidades que hayan presentado fallas, ya que, el refuerzo presenta un comportamiento lineal elástico hasta la falla.
- A nivel de comportamiento estructural, un desplazamiento de las barras de refuerzo de GFRP respecto a la mitad de la celda, no presenta un aumento significativo en la capacidad máxima de carga (alrededor del 13% para barras #6 y del 25% para barras #5). Por lo tanto, a nivel de análisis estructural del elemento sometido a cargas por fuera del plano no es posible tener en cuenta este aumento en la profundidad efectiva.
- Teniendo en cuenta el comportamiento lineal entre la segunda derivada de la deflexión y el momento actuante, fue posible determinar el módulo de elasticidad de la mampostería de concreto ante sollicitaciones de flexión fuera del plano principal. Sin embargo, este valor es de aproximadamente el 18% del módulo de elasticidad especificado en el Título D de la NSR-10.
- La presencia del traslapeo en un muro de mampostería de concreto no genera una disminución importante en la capacidad de carga. Sin embargo, su rigidez

aumenta generando una disminución en las deflexiones máximas respecto al muro control.

- Utilizando la Ecuación 15, planteada para evaluar la longitud de traslape mínima para las barras de GFRP utilizada como refuerzo interno para muros de mampostería se preveen longitudes de desarrollo aproximadamente un 70% de las evaluadas con la ecuación que se encuentra definida en ACI 440.1R-15 para estructuras de concreto.

Para continuar con la investigación se recomienda:

- Plantear un programa experimental que permita evaluar la pertinencia del modelo matemático planteado para evaluar la longitud de desarrollo de barras de GFRP utilizadas como refuerzo interno en muros de mampostería de concreto.
- Evaluar el factor de reducción de respuesta sísmica de las estructuras “R”, para elementos de mampostería reforzada internamente con barras de GFRP, teniendo en cuenta, el comportamiento lineal elástico hasta la falla y su baja ductilidad comparada con el acero estructural.
- Plantear un programa experimental que permita evaluar la incidencia de otras variables físicas de las barras de refuerzo como el tipo de FRP, propiedades mecánicas y características de la superficie.
- Evaluar el comportamiento de los muros de mampostería de concreto sometido a otro tipo de solicitaciones

9. Bibliografía

- Al-Jabari, Z., Myers, J. J., & ElGawady, M. (2015). Out-of-plane strengthening of reinforced masonry walls using near-surface mounted (NSM) FRP bars with epoxy and cementitious material. *Advanced Composites in Construction, ACIC 2015 - Proceedings of the 7th Biennial Conference on Advanced Composites In Construction, April 2019*, 195–200. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1873.2240>
- Basaran, B., & Kalkan, I. (2020). Development length and bond strength equations for FRP bars embedded in concrete. *Composite Structures*, 251(February). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112662>
- Buitrago, B. (2020). *Comportamiento a Flexión De Elementos de Concreto Reforzados con Barras de GFRP*.
- Caez, J. C. (2004). *Caracterización y patología de la mampostería en la ciudad de Barranquilla*.
- Eltantawi, I., Alnahhal, W., El Refai, A., Younis, A., Alnuaimi, N., & Kahraman, R. (2022). Bond performance of tensile lap-spliced basalt-FRP reinforcement in high-strength concrete beams. *Composite Structures*, 281(November 2021), 114987. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114987>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (1997). *Norma Técnica Colombiana NTC 4026. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural*. 4–5.
- Kelln, R. (2014). *Evaluation Of Required Splice Lengths For Reinforcing Bars In Masonry Wall Construction* (Issue August).
- Lees, J. M., Gruffydd-Jones, B., & Burgoyne, C. J. (1995). *Expansive cement couplers: A means of pre-tensioning fibre-reinforced plastic tendons*.
- Michaud, D., Fam, A., & Dagenais, M. A. (2021). Development length of sand-coated GFRP bars embedded in Ultra-High performance concrete with very small cover. *Construction and Building Materials*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121384>
- Molano Camargo, M. C., & Torres Castellanos, N. (2017). *Prácticas de Laboratorio de Materiales para Obras de Ingeniería Civil*.
- Nanni, A., De Luca, A., & Jawaheri Zadeh, H. (2014). Reinforced Concrete with FRP Bars. In *Reinforced Concrete with FRP Bars*. <https://doi.org/10.1201/b16669>
- Otálora, D. (2017). *Comportamiento Ante Carga Perpendicular al Plano, de Muros de Mampostería en Concreto, Reforzados con Barras de FRP*.
- Quintana Ruiz, L. A. (2017). *Comportamiento a flexión pura, de muros de mampostería en arcilla, reforzados con barras de FRP*. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/621>
- S. J. Chamberlin. (1952). *Spacing of Spliced Bars in Tension Pull-Out Specimens*. 49(12), 261–274.
- Urbina Gomez, J. A. (2020). *Influencia de la longitud de traslapo en la capacidad a flexión*

de muros de mampostería reforzados internamente con barras de GFRP ante cargas fuera del plano.

Wilcox, K. (2017). Frp Wrap Gives Old Bridge New Life. *Frp Wrap Gives Old Bridge New Life*.

Zhou, J., Stümpel, M., Kang, C., & Marx, S. (2022). Lap-spliced connections of steel and FRP bars in reinforced flexure concrete structures. *Engineering Structures*, 263(December 2021), 114409. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114409>