



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Reforzamiento por una cara de muros de mampostería de arcilla con unidades de perforación horizontal**

**Cesar Fernando Gamba Tiusaba**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería civil y agrícola  
Bogotá, Colombia

2019



# **Reforzamiento por una cara de muros de mampostería de arcilla con unidades de perforación horizontal**

**Cesar Fernando Gamba Tiusaba**

Trabajo final de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería civil - Estructuras**

Directora:

Ing. Caori Patricia Takeuchi

Línea de Investigación:

Reforzamiento estructural

Grupo de Investigación:

Análisis, diseño y materiales GIES

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería civil y agrícola

Bogotá, Colombia

2019

# Contenido

	Pág.
<b>Agradecimientos</b> .....	<b>6</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>7</b>
Reforzamiento con láminas de fibras de carbono con polímeros.....	10
Reforzamiento con varillas de fibra vidrio.....	11
Reforzamiento con mallas de polímero.....	13
Reforzamiento con cables.....	14
Refuerzo con mallas electrosoldadas.....	15
<b>1. Marco teórico</b> .....	<b>21</b>
1.1 Antecedentes históricos.....	21
1.2 Materiales.....	22
1.2.1 Tipos de unidades de mampostería estructural.....	22
1.2.2 Mortero de pega.....	24
1.2.3 Mortero de relleno.....	25
1.2.4 Acero de refuerzo.....	25
1.3 Clasificación de la mampostería estructural.....	26
1.3.1 Mampostería de cavidad reforzada.....	26
1.3.2 Mampostería reforzada.....	27
1.1.1 Mampostería parcialmente reforzada.....	29
1.3.3 Mampostería no reforzada.....	29
1.3.4 Mampostería de muros confinados.....	30
1.3.5 Mampostería de muros diafragma.....	31
1.4 Tipologías de falla en muros de mampostería.....	31
1.5 Muros de perforación horizontal con bloque #5.....	33
<b>2. Metodología</b> .....	<b>36</b>
2.1 Materiales.....	38
2.1.1 Unidades.....	38
2.1.2 Mallas de acero.....	39
2.1.3 Ensayo de morteros.....	39
2.2 Construcción muretes de ensayo.....	43
2.3 Ensayos muros de mampostería.....	46
2.3.1 Compresión.....	46
2.3.2 Tensión diagonal.....	50
2.3.3 Disposiciones varias.....	52
2.4 Resumen normas utilizadas.....	53
<b>3. Resultados y análisis</b> .....	<b>55</b>

---

3.1	Unidades de mampostería .....	55
3.2	Mallas electrosoldadas.....	56
3.3	Morteros de pega .....	58
3.3.1	Compresión en el mortero de pega.....	58
3.3.2	Fluidez en el mortero de pega.....	58
3.4	Mortero de pañete.....	59
3.4.1	Compresión mortero para pañetes sin fibras de acero .....	59
3.4.2	Fluidez mortero de pañete sin fibras de acero .....	60
3.4.3	Tensión indirecta en el pañete sin fibras de acero.....	60
3.4.4	Tensión indirecta en el pañete con fibras de acero.....	61
3.5	Compresión en muretes de mampostería.....	62
3.6	Tracción diagonal en muretes.....	68
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>75</b>
4.1	Conclusiones.....	75
4.1.1	Ensayo de compresión muros de mampostería .....	75
4.1.2	Ensayo de tensión diagonal .....	76
4.2	Recomendaciones .....	77
<b>A.</b>	<b>Anexo A. ....</b>	<b>79</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>86</b>

## Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia por haberme aceptado en sus aulas y por formarme no solo como profesional, sino como persona, en sus salones aprendí el valor de la disciplina y el esfuerzo, en sus docentes aprendí el significado de mi carrera y los valores de esta y en sus recintos esboce mi futuro y pinte mis sueños,

A mis padres ALBA MERY TIUSABA BENITEZ y RIGOBERTO ALEJANDRO GAMBA SEGURA por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas y su esmero en enseñarme el buen camino, en que toda semilla tiene su fruto y toda cosecha tiene su recompensa, a mi hermana ANGELA CAMILA por ayudarme a ver mi carrera desde una perspectiva distinta y por su apoyo prestado.

A la profesora y directora de mi trabajo, CAORI PATRICIA TAKEUCHI TAN, sin sus guías y saberes hubiese sido muy difícil llevar a buen término este proyecto, la dedicación y entrega que muestra en cada actividad en la cual se embarca es ejemplo de vocación y disciplina.

## Introducción

El uso de la mampostería es una de las técnicas de construcción más antiguas y extendidas a lo largo de la historia humana; muchos de los monumentos que existen hoy en día son muestra de ello. Su bajo costo, durabilidad y su facilidad de fabricación hacen que aun hoy sea una opción para ser tomada en cuenta.

Sin embargo, en eventos sísmicos, se ha hecho evidente que viviendas y edificaciones fabricadas con mampostería simple (sin acero de refuerzo), pueden ser un riesgo para los residentes ya que no brindan características de ductilidad ni resistencia apropiadas.

Por esta razón se han creado códigos y se han introducido nuevos sistemas de construcción, que garanticen la seguridad tanto de la vivienda como de sus habitantes ante cargas gravitacionales y sísmicas. Este esfuerzo ha permitido reducir el riesgo que representaban estas estructuras. Sin embargo, para el caso colombiano, es usual que en viviendas informales, se usen paredes de unidades de perforación horizontal sin acero, como muros de carga y de corte (Figura 1-1), aun cuando los códigos de diseño y construcción sismo resistentes prohíban su uso como sistema principal de resistencia sísmica. A esto se suma el hecho de que estas viviendas se construyen con técnicas inadecuadas, lo cual aumenta su vulnerabilidad.

Figura 1-1 Muro de mampostería sin reforzamiento 1. Fuente (Propia).



Para mejorar el comportamiento de viviendas con muros sin acero de refuerzo, se pueden encontrar técnicas de mejora como es el reemplazo de estos muros, lo que implica su remoción y la construcción de un nuevo muro similar a los existentes en la construcción (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2001). Esto es viable cuando se requieren reemplazar algunos muros, sin embargo, en muchos casos, implicaría demoler gran parte de la vivienda y volver a construir.

Otra solución muy frecuente es el confinamiento de estos muros construidos con unidades ya sean huecas, macizas de concreto, arcilla o silicio calcáreos con elementos de concreto reforzado o perfiles de acero encargados de darle ductilidad a la edificación y suministrarle capacidad de deformarse. Para esto, se abren unas regatas en los muros donde finalmente se construirán los elementos de confinamiento, véase Figura 1-2y Figura 1-3.

Figura 1-2 Mampostería confinada 1.  
Fuente (Propia)



Figura 1-3 Mampostería confinada 2.  
Fuente (Propia)



Sin embargo, esta metodología de reforzamiento no siempre se puede emplear, ya que, en algunos de casos, las características arquitectónicas o el tamaño de la edificación imposibilitan la inserción de elementos de confinamiento, en los muros o paredes de la edificación.

Un ejemplo de este problema se puede encontrar en las Figura 1-4 Y Figura 1-5, construidas en zona de amenaza sísmica intermedia en el departamento de



Boyacá, donde se puede observar que la edificación de 4 pisos no tiene ningún tipo de sistema de resistencia sísmica, aparte de los muros de perforación horizontal y el tratar de realizar un sistema de marcos rígidos en los muros de esta edificación, podría ser un factor de riesgo para un posible colapso estructural, si no se realiza con las condiciones de soporte y seguridad adecuadas.

Figura 1-4 Viviendas mampostería sin confinamiento 1. Fuente (Propia)

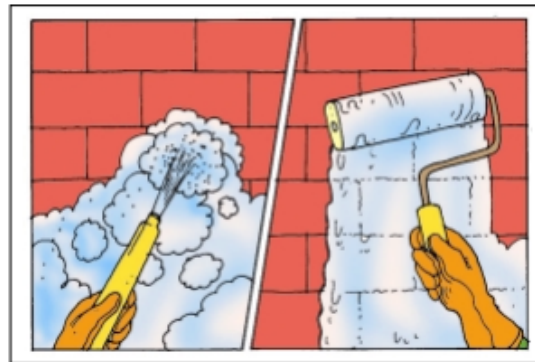


Figura 1-5 Viviendas mampostería sin confinamiento 2. Fuente (Propia)



También se encuentra el revestimiento mediante fibras compuestas sueltas o aglomeradas en láminas como se observa en la Figura 1-6. (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2001). Las fibras delgadas se aplican a la cara del muro, mejorando su resistencia, sin embargo, no aumentan su rigidez.

Figura 1-6 Refuerzo de muro mediante revestimiento 1. fuente (AIS, Manual de Construcción Evaluación y Rehabilitación Sismo resistente de Viviendas en Mampostería, 2001.)

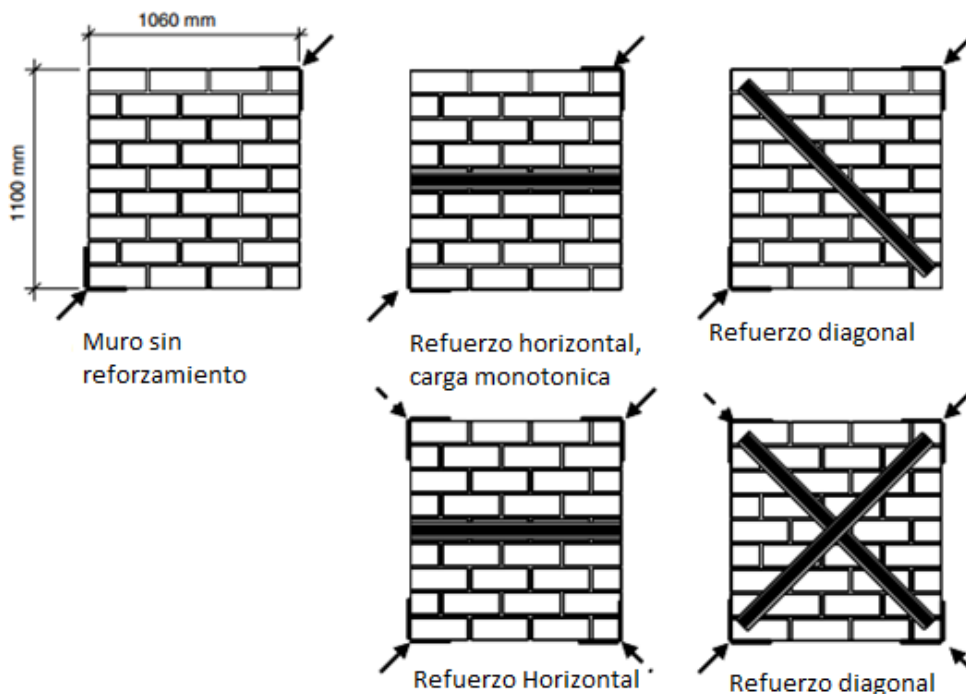


Se encuentran estudios que contemplan otros tipos de reforzamiento como son el refuerzo externo con: láminas de aluminio, fibras de carbono adicionadas con polímeros, mallas de polímeros, varillas de vidrio, cables de aceros y mallas electrosoldadas entre otros. A continuación, se expondrán más detalladamente estas metodologías de reforzamiento.

### Reforzamiento con láminas de fibras de carbono con polímeros.

Santa María et al. (2004) estudiaron el comportamiento de muros con fibras de carbón reforzadas con polímeros o (FCRP), siendo estos, un compuesto de carbón o vidrio de alta resistencia que entretejidos con resina de polímeros para lograr una matriz densa y compacta. Se hicieron ensayos de muros con diferente disposición de laminas de FCRP instaladas en ambas caras del muro como se observa en la Figura 1-7.

Figura 1-7 Refuerzo con FCRP. fuente: adaptado de (Santa-Maria et. al., 2004)



Según Santa María et al. (2004) el refuerzo con FCRP aumenta la rigidez de los muros, disminuye el tamaño de las fisuras (en cuanto espesor y extensión) y

disminuye la falla frágil por corte. Se encontró también que la colocación en forma diagonal de FCRP, presentó mejor comportamiento al incrementar la resistencia del muro en un 70%. Sin embargo, las láminas de FCRP se desprenden cuando la sollicitación a compresión en los muros es alta, como se observa en la Figura 1-8.

Figura 1-8 Refuerzo con FCRP desprendimiento de láminas. fuente (Santa-Maria et al., 2004)



### **Reforzamiento con varillas de fibra vidrio**

Este tipo de reforzamiento estudiado por (Tumialan et. al., 2007), es de los más apreciados por sus características estéticas y su poca incidencia en la arquitectura de la edificación, además, permite mantener el ancho original del muro. Su costo de instalación es pequeño. El uso de varillas de fibra de vidrio no requiere preparar la superficie por métodos abrasivos, las varillas se introducen en las juntas horizontales.

Las varillas de fibra de vidrio que se utilizan para el reforzamiento de mampostería están recubiertas con una capa de arena fina que permite mejorar la adherencia entre el mortero de la pared con la pasta de epóxico.

El proceso constructivo consiste en hacer una ranura a lo largo del mortero de pega de la mampostería quitando el polvo con aire comprimido, aplicar una capa de epóxico (pega), véase Figura 1-9, colocar la varilla en la junta y finalmente enrasar el epóxico, véase Figura 1-10.

Figura 1-9 Reforzamiento con varillas de vidrio 1. fuente (Tumialan et al., 2007)



Figura 1-10 Reforzamiento con varillas de vidrio 2. fuente (Tumialan et al., 2007)



En el estudio de Tumialan et al. se encontró que los especímenes ensayados con esta técnica alcanzan distorsiones de 0.7% sin perder su capacidad resistente a carga lateral y que la resistencia de los muros con el refuerzo aumentó un 50% sin que la degradación de rigidez lateral implicara degradación de resistencia.

También se encontró que:

- En los muros reforzados con varillas de fibra de vidrio se presentaron mayor cantidad de fisuras pero que estas fueron más finas.
- Para una distorsión de 0.7%, las deformaciones unitarias de las varillas oscilaron entre 5000 y 7000 mS, lo que representa el 30% de la deformación de rotura de estas varillas.
- Los resultados del ensayo de simulación sísmica transversal al plano de los tabiques previamente sometidos a distorsiones coplanares de 0.7%, indicaron que no se requería reforzarlos por flexión.
- En el ensayo monotónico, donde se aplicaron distorsiones superiores a 0.7% (hasta 6%), los bloques y fragmentos del muro se dislocaron y rotaron independientemente sin embargo, el muro no colapsó debido al confinamiento proporcionado por el pórtico

## Reforzamiento con mallas de polímero

Dávila (2011) estudió el reforzamiento con mallas de polímero ( Figura 1-11 y Figura 1-12) Este tipo de reforzamiento es constructivamente similar al que se hace con mallas electrosoldadas. Sin embargo, al poderse instalar de manera continua permite mejor manejo en las esquinas de los muros, debido a que se puede instalar de manera continua.

Figura 1-11 Refuerzo con mallas de polímero 1. Fuente (Dávila, 2011)

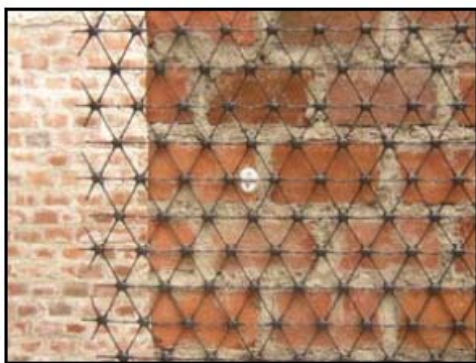


Figura 1-12 Refuerzo con mallas de polímero 2. Fuente (Dávila, 2011)



Dávila (2011) encontró que, al utilizar esta metodología de reforzamiento, se logra mejorar el desempeño sísmico y la capacidad de disipación de energía en la mampostería. La distribución de las fisuras en muros no reforzados y muros reforzados con mallas de polímero es diferente. Mientras que, en el primer caso, se presentan fisuras únicas a lo largo de la o las diagonales del panel; en el segundo caso, se presentan fisuras dispersas de menor tamaño, previendo un colapso temprano del muro y alcanzando una mayor resistencia última con mayor disipación donde las aberturas triangulares de la malla de polímero ayudan a redireccionar y redistribuir las fisuras en ambas direcciones diagonales disminuyendo la fragilidad de los muros simples.

## Reforzamiento con cables

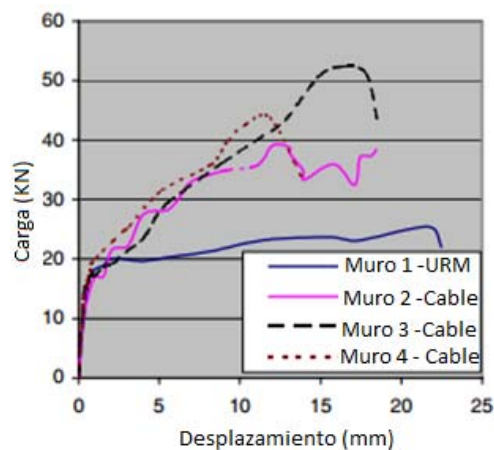
Chuang et. al., (2004) estudiaron el comportamiento de muros reforzados con cables instalados en forma de "X" véase Figura 1-13 anclados a placas en las esquinas del muro donde en una de las esquinas se permite el movimiento.

Figura 1-13 Refuerzo con cables 1.  
Fuente (Chuang et al., 2004)



Se encontró que la utilización de cables permite a los muros reforzados desarrollar una resistencia última de casi el doble de los que no tienen refuerzo (Figura 1-14) debido a que los esfuerzos se absorben por medio de tensión y compresión de los cables de acero. También se da al muro mayor ductilidad y capacidad de disipar energía mejorando su comportamiento frente a eventos sísmicos y se mejora su resistencia frente a eventos sísmicos. Además, esta metodología de reforzamiento es económica, constructivamente eficiente, durable y respetuosa con los espacios arquitectónicos

Figura 1-14 Curva carga desplazamiento refuerzo con cables. Fuente, adaptado de (Chuang et al., 2004)



## Refuerzo con mallas electrosoldadas

En este tipo de reforzamiento, se colocan en ambas caras de la mampostería mallas electrosoldadas, conectadas entre ellas, con conectores transversales pasantes. Posteriormente se recubre el muro con mortero. Véase Figura 1-15. Según (Bartolom et al.,2002) el uso de malla electrosoldada y pañete incrementa el desempeño en los muros frente a sollicitaciones sísmicas, y mejora el comportamiento relacionado con la integridad estructural del muro permitiendo obtener una mayor resistencia del elemento no estructural y disminuyendo la posibilidad de una falla frágil por corte.

Figura 1-15 Refuerzo de muros de Mampostería con mallas electrosoldadas. Fuente (Bartolom et al., 2002).

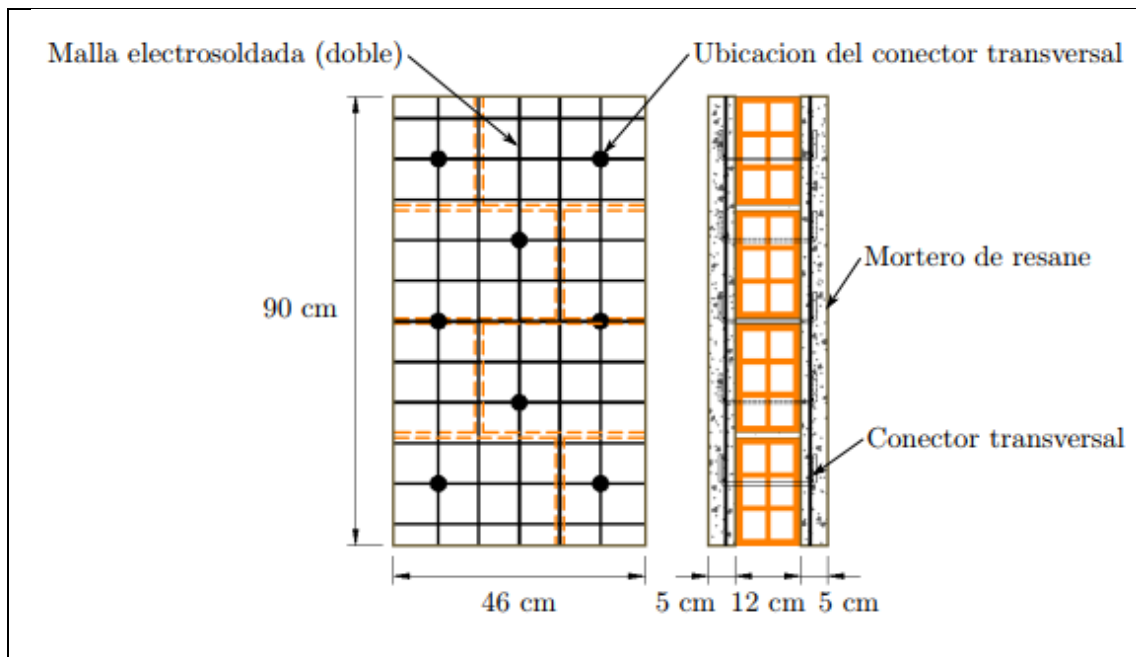


Bartolom et al.(2002) encontraron que en edificaciones de un solo piso, no se requiere colocar una malla electrosoldada en toda la superficie del muro de

mampostería, basta con reforzar las esquinas o unión entre muros y la parte superior de las paredes.

Con relación al uso de la malla electrosoldada para mejorar el desempeño de muro, también en Colombia se han desarrollado investigaciones de este tipo, como la de (Sandoval, 2020), en donde se estudió el comportamiento de muros con unidades de perforación horizontal sin reforzamiento y con diferentes opciones de reforzamiento de mallas a ambas caras del muro y conectores entre estas, como la que se muestra en la Figura 1-16.

Figura 1-16 Refuerzo con malla electrosoldada. Fuente (Sandoval, 2020)



Sandoval (2020) encontró en ensayos a compresión, tensión diagonal y carga cíclica horizontal que los muretes reforzados tuvieron mayor resistencia y rigidez a compresión y tensión diagonal con respecto a los no reforzados. También, halló que la cantidad de conectores transversales influye en el comportamiento estructural, donde los muretes con mayor número de conectores tuvieron mayor resistencia.



En los anteriores párrafos se han mencionado técnicas para mejorar el comportamiento de muros simples, sin embargo, no todos son aplicables para viviendas informales construidas con unidades de perforación horizontal sin acero de refuerzo.

El reemplazo de muros existentes o su confinamiento con elementos estructurales implican en muchos casos, graves afectaciones a la vivienda. El uso de láminas de aluminio como refuerzo externo, aunque incrementa sustancialmente la resistencia de los muros ante cargas laterales tiene el inconveniente del alto costo en materiales y mano de obra (Viviana & Rougier, 2007). La colocación de láminas de FCRP o varillas de vidrio si bien mejoran el comportamiento de los muros, son de alto costo, especialmente para los usuarios de viviendas informales. La utilización de mallas de polímeros, es una alternativa siempre y cuando se tengan las capacidades técnicas para su uso (Shrestha et. al., 2012).

Por otro lado, el uso de la malla electrosoldada recubierta con pañete también es una opción que incrementa el desempeño en los muros frente a sollicitaciones sísmicas, y mejora el comportamiento relacionado con la integridad estructural del muro (Bartolom et al.,2002), y con respecto a los anteriormente mencionados puede ser una solución económicamente viable para los residentes de las viviendas informales con materiales que se encuentran fácilmente en los mercados locales, Sandoval (2020).

Sin embargo, los estudios sobre el reforzamiento con malla electrosoldada fueron realizados aplicándolo en ambas caras del muro; situación que no siempre se puede efectuar porque no se tiene acceso a una de las caras del muro, porque son muros extremos y se puede alterar propiedades vecinas o porque muchas unidades habitacionales no cuentan con suficientes muros en los cuales se puede efectuar el reforzamiento de ambas caras del muro.

Ante el panorama mostrado anteriormente se ve la necesidad de estudiar una metodología de reforzamiento en una sola cara, aplicable al caso colombiano, encaminada a dar una solución que aumente el nivel de seguridad de sus viviendas, ya que en Colombia como en otros países de Latinoamérica, hay una gran cantidad de viviendas en mampostería simple construidas con unidades de arcilla de perforación horizontal (bloque #5, bloque #4, etc..) cuyo comportamiento ante eventos sísmicos es pobre debido a que son frágiles y tienen baja capacidad de disipar energía.

Por esta razón en este trabajo se estudió una alternativa de reforzamiento en una sola cara para mampostería simple con unidades de perforación horizontal #5, (ya que no siempre se pueden intervenir ambos lados del muro) para aumentar la capacidad y la rigidez del muro y evitar la falla típica de este tipo de muro, También se buscó un reforzamiento que no requiriera mano de obra altamente calificada ni equipos de construcción costosos y que además utilizara materiales de uso común. Los objetivos del estudio fueron los siguientes:

#### OBJETIVO GENERAL.

Determinar la factibilidad del reforzamiento por una cara de muros de mampostería de arcilla con unidades de perforación horizontal (Bloque #5), con malla electrosoldada y fibra de acero.

#### OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Determinar la resistencia a compresión de muretes reforzados por una cara con malla y fibra.
- Determinar la carga máxima en ensayos de tensión diagonal.
- Determinar la factibilidad del reforzamiento por una cara de muros de mampostería de arcilla con unidades de perforación horizontal (Bloque #5) con malla electrosoldada y fibra de acero con base en la comparación de muros reforzados y no reforzados.

El presente documento tiene 4 capítulos que brevemente se describen a continuación.

### **Capítulo 1 – Marco teórico.**

En este capítulo se tratarán los principales aspectos de la mampostería estructural tales como, antecedentes históricos, sistema de construcción, tipo de unidades de mampostería, morteros de pañete y pega, tipos de sistemas estructurales avalados por la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10 (AIS, 2010), el acero de refuerzo y la normativa que rige la calidad e idoneidad de los materiales de construcción utilizados. Además, se mostrarán las diferentes tipologías de falla.

### **Capítulo 2 – Metodología.**

En este capítulo se encuentra, la metodología desarrollada, para el trabajo investigativo. Se presentará la caracterización mecánica de las mallas electrosoldadas, unidades de mampostería, morteros de pega y pañete. Además, se describirán los aditamentos usados o fabricados para el montaje, la construcción, o el ensayo de los muros. También se encuentra el proceso constructivo de los muretes, la instalación de los anclajes de plástico expansivos y malla electrosoldada, la colocación del mortero de pañete en los diferentes especímenes y la instrumentación de los especímenes. Seguidamente se expone el tipo de ensayos realizados en cada grupo de muretes, las particularidades de cada etapa y el procesamiento de datos.

### **Capítulo 3 – Resultados**

En este capítulo se presentan los datos registrados en las diferentes etapas de ensayos expuestas en la metodología, las gráficas, fotografías, tablas e imágenes y los datos ya procesados. Además, se analizan los resultados, se encuentran parámetros de disipación de energía y el comportamiento de muros sin reforzamiento y muros con el reforzamiento estudiado en el presente trabajo.

**Capítulo 4 – Conclusiones y recomendaciones.**

En este capítulo se encuentran las conclusiones, limitaciones y recomendaciones encontradas en este trabajo.

# **1. Marco teórico**

En este capítulo se expondrá una breve reseña histórica de la mampostería estructural, se presentan las características principales de los materiales de construcción usados en la elaboración de muros de mampostería, sus propiedades, su uso y tipo, normatividad aplicable, los diferentes sistemas estructurales de mampostería contemplados en la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), las tipologías de falla, las diferentes metodologías de reforzamiento para muros con unidades de perforación horizontal.

## **1.1 Antecedentes históricos**

A lo largo de la historia, el ser humano ha tenido la necesidad de construir edificaciones para satisfacer sus necesidades y requerimientos. Una de las técnicas utilizadas desde esos tiempos es lo que hoy en día se conoce como mampostería; cuyo éxito se ve reflejado en el hecho de que muchas de estas edificaciones perduran hasta nuestra era.

El tipo y calidad de la mampostería que se fabricaba ancestralmente dependía en gran medida de las condiciones geográficas de la zona en la cual se ubicaban los diferentes grupos humanos; por ejemplo, asentamientos que se encontraran cerca de las orillas de ríos, tendrían el material de aluvión como principal insumo de construcción, mientras que poblaciones asentadas cerca de montañas y picos, tendría un suministro constante de roca para satisfacer sus necesidades.

Las primeras unidades de mampostería tenían tamaños pequeños y formas cuadradas, eran fabricadas de manera manual y secadas al sol. A medida que se tecnificaban los procesos de fabricación, se dio lugar a una diversificación de formas en las unidades, que sumado al uso de hornos de cocción en donde se podrían alcanzar altas temperaturas, permitieron mejorar considerablemente las propiedades mecánicas y la durabilidad de estos materiales. El efecto directo de

estas innovaciones fue el inicio de la producción industrial de materiales para la construcción.

Con la fabricación de ladrillos de arcilla cada vez más industrializada, se impulsó el uso masivo de ladrillos, ya que fue posible conseguir unidades de alta resistencia, con dimensiones uniformes (cumpliendo tolerancias dimensionales) y con variedad de formas, tamaños, colores y texturas a un precio competitivo, que permitió su uso intensivo en la construcción.

## **1.2 Materiales**

Para la construcción de muros estructurales y no estructurales en mampostería se utilizan unidades y mortero de pega. En caso de la mampostería reforzada adicionalmente se usa acero y mortero de relleno. A continuación, se hace una breve descripción de los materiales que se utilizan para la construcción de muros reforzados.

### **1.2.1 Tipos de unidades de mampostería estructural**

Desde un punto de vista general las unidades de mampostería poseen una forma de paralelepípedo, en donde puede encontrarse unidades totalmente macizas o con perforaciones, en las cuales se hace posible la colocación, ya sea del acero de refuerzo y/o del mortero de relleno (Serna, 2019).

Así mismo las unidades de mampostería se pueden clasificar tanto por el tipo de material con que fueron fabricados, como por su geometría. En la primera clasificación se tienen unidades de concreto, unidades de arcilla y unidades silico calcáreas. En la segunda clasificación se tienen, unidades de perforación vertical (Figura 1-1), unidades típicas sólidas (Figura 1-3), unidades de perforación horizontal (Figura 1-2) y unidades especiales (Figura 1-4) (Takeuchi, 2010).

Figura 1-1 Unidad con perforación vertical.  
Fuente: (Elaboración propia)

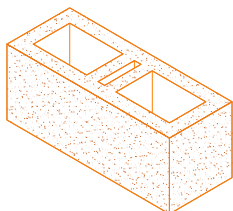


Figura 1-2 Unidad con perforación horizontal.  
Fuente: (Elaboración propia)

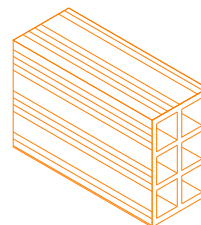


Figura 1-3 Unidad macizas.  
Fuente: (Elaboración propia)

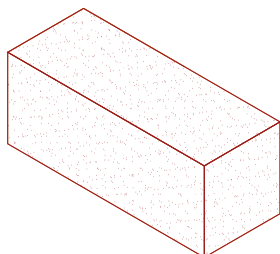
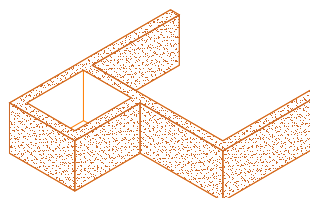


Figura 1-4 Unidad Especiales.  
Fuente: (Elaboración propia)



El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR10) por sus siglas, contempla el diseño de la mampostería estructural y describe los materiales que se utilizan para la construcción, incluyendo las unidades de mampostería estructural y no estructural. De acuerdo con los diferentes tipos de unidades se relacionan en la Tabla 1 las Normas Técnicas Colombianas o (NTC) por sus siglas, que les aplica.

Tabla 1 Normatividad aplicada a las unidades de mampostería estructural y no estructural en Colombia

<b>Normas</b>	<b>Descripción</b>
<i>NSR-10 Titulo D</i>	Mampostería estructural
<i>NTC-4205:2009</i>	Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillo y bloques cerámicos
<i>NTC-4205-1:2009</i>	Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillo y bloques cerámicos parte 1: Mampostería estructural

NTC-4205-2:2009	Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillo y bloques cerámicos parte 2: Mampostería no estructural
NTC-4205-3:2009	Unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillo y bloques cerámicos parte 3: Mampostería de fachada
NTC-922:1975	Ladrillos silico calcáreos
NTC-4017:2018	Método para muestreo y ensayos de unidades de mampostería de arcilla

### 1.2.2 Mortero de pega

El mortero de pega se elabora con la combinación de materiales cementantes o aglutinantes, agregados y aditivos, que, al mezclarse con una cantidad de agua, forman una masa plástica que se adhiere a la superficie y se endurece, preservando la forma que se le haya dado antes de su curado.

Las principales propiedades del mortero de pega son la manejabilidad, la retención de agua y la tasa de endurecimiento. Un mortero debe ser lo suficientemente manejable para que se pueda adherir al palustre y extender de una manera sencilla a las superficies. Estas características dependen del contenido de agua en los agregados y el agua de mezclado, la granulometría de los áridos y del cemento, así como el contenido de aire que tenga la mezcla.

La retención de agua indica la capacidad de absorber agua del mortero; esta característica influye de manera significativa en la resistencia y la manejabilidad de la mezcla. Finalmente, la tasa de endurecimiento del mortero es la velocidad a la cual el mortero de pega se endurece, este aspecto influye en el rendimiento, la adherencia y la resistencia de la mezcla.



### **1.2.3 Mortero de relleno**

El mortero de relleno o mortero de inyección es una mezcla de materiales cementantes, agregados, agua y aditivos, que se colocan en las celdas de unidades de perforación vertical, en unidades especiales o en el espacio intermedio donde se coloca acero de refuerzo de muros de cavidad reforzada.

El mortero de relleno que rodea al acero cumple una doble función: la primera consiste en unir el acero con el mampuesto, formado por las unidades y el mortero de pega, con el fin de garantizar un trabajo conjunto y que exista compatibilidad de deformaciones, y la segunda es la de arriostrar la varilla en toda su longitud.

Adicionalmente en la celdas en las cuales no hay barra de refuerzo, se puede colocar mortero de relleno para aumentar la sección transversal del muro (Takeuchi, 2010).

### **1.2.4 Acero de refuerzo**

“El acero es una aleación de hierro con pequeñas cantidades de otros elementos, es decir, un material combinado con porcentaje de carbono comprendido entre el 0,05% y 1,7%”(Serna, 2019).

“El acero de refuerzo en la mampostería se diseña para que sea capaz de resistir los esfuerzos tanto de corte como de tracción, que se inducen a partir de las diferentes condiciones de carga a las que puede ser sometida la estructura” (Serna, 2019).

El reglamento NSR-10, establece que cada barra corrugada de acero de refuerzo de concreto debe cumplir la NTC 2289. De la misma manera el título D de este reglamento establece que.

- Todo tipo de refuerzo que se utilice para la construcción de mampostería estructural debe estar embebido en el mortero de pega o relleno.

- El refuerzo debe tener una superficie limpia de grasas, arcillas y demás sustancias perjudiciales.
- No debe presentar corrosión, aunque puede permitirse, a juicio del supervisor técnico, la oxidación superficial.
- Todo refuerzo debe cumplir con las dimensiones, figuración y ubicación indicadas en los planos.
- No es permitido realizar dobleces al acero de refuerzo que ya se encuentre parcialmente embebido en el mortero.

### **1.3 Clasificación de la mampostería estructural**

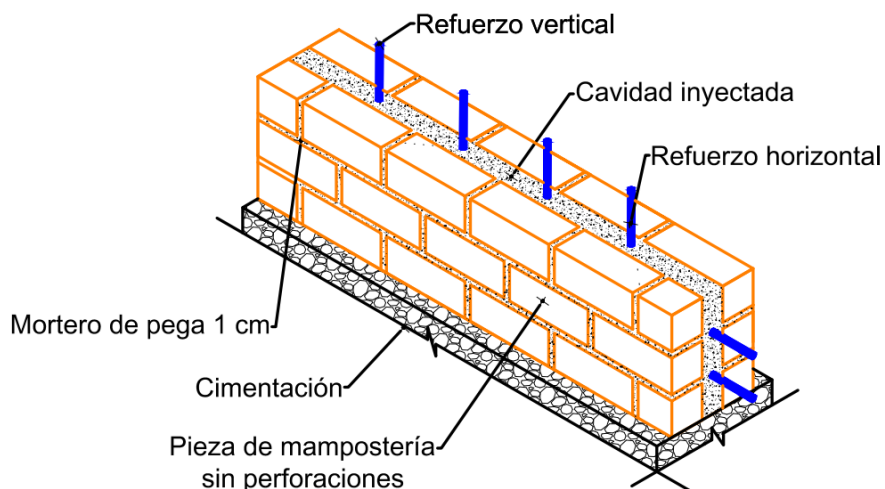
La mampostería estructural es un sistema constructivo con muros de carga, los cuales adicionalmente rigidizan la edificación para que se mantenga por debajo de los límites de desplazamiento lateral en el momento de un evento sísmico. (Jesús Humberto Arango, 2001). Según el Reglamento NSR-10, la mampostería estructural tiene la siguiente clasificación.

- Mampostería de cavidad reforzada
- Mampostería reforzada
  - Mampostería totalmente inyectada
  - Mampostería parcialmente inyectada
- Mampostería parcialmente reforzada
- Mampostería no reforzada
- Mampostería de muros confinados
- Mampostería de muros diafragma

#### **1.3.1 Mampostería de cavidad reforzada**

Consiste en dos paredes de mampostería, separadas por un espacio continuo en el que se funde concreto reforzado, las caras se ubican de manera paralela una en frente de la otra. (Capítulo D.6 de la NSR-10, 2010), véase ( Figura 1-5).

Figura 1-5 Mampostería de cavidad reforzada. fuente (Elaboración propia)



### 1.3.2 Mampostería reforzada

Se construye con base en unidades de mampostería de perforación vertical, que están unidas entre si mediante mortero de pega, y con un refuerzo interno en la cavidad de las unidades, de barras y alambres de acero. (Capítulo D.7 de la NSR-10, 2010), véase ( Figura 1-6 ) y (Figura 1-7).

Figura 1-6 Mampostería reforzada. fuente (Elaboración propia)

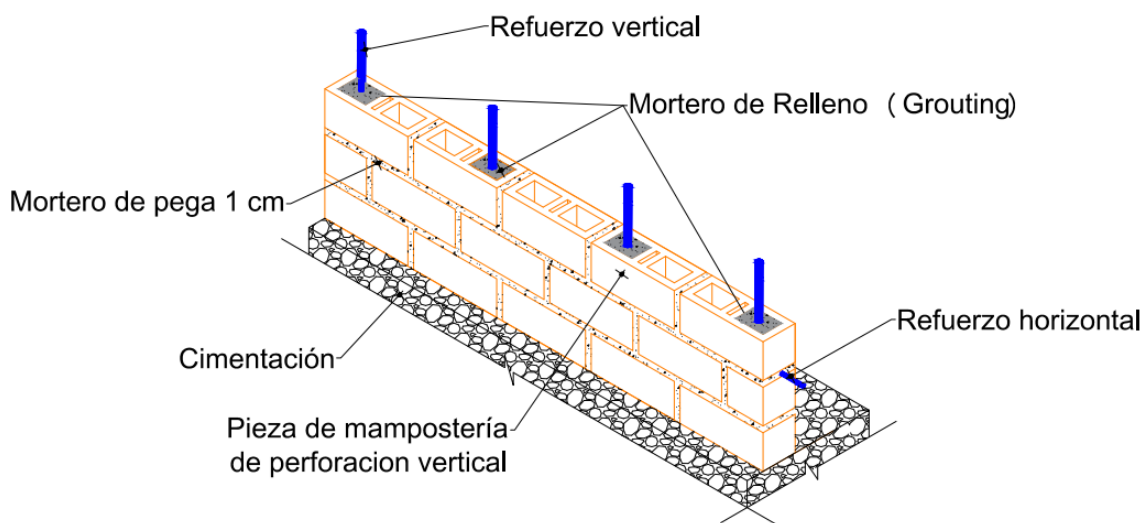


Figura 1-7 Mampostería reforzada (planta). fuente (Elaboración propia)



Dentro de este tipo de armado, pueden encontrarse la mampostería totalmente inyectada, véase (Figura 1-8), en donde todas las celdas de la unidad están rellenas con mortero (grouting) y parcialmente inyectada, véase (Figura 1-9), en donde no todas las celdas del bloque de perforación vertical están rellenas de mortero.

Figura 1-8 Mampostería reforzada totalmente inyectada. fuente (Elaboración propia)

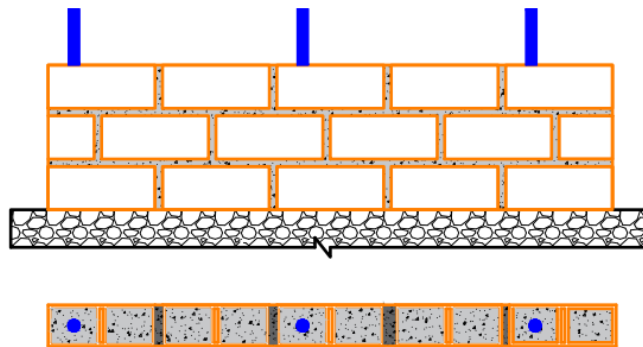
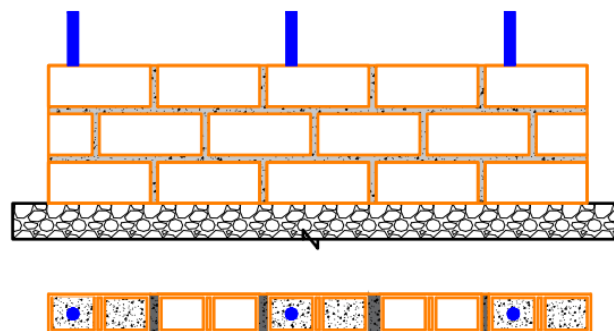


Figura 1-9 Mampostería reforzada parcialmente inyectada. fuente (Elaboración propia)



### 1.3.3 Mampostería parcialmente reforzada

Es la construcción basada en unidades de mampostería de perforación vertical ligadas entre sí por medio de mortero, reforzada con barras y alambres de acero, para efectos de diseño sísmo resistente, se contempla como uno de los sistemas con capacidad de disipación moderada de energía según la NSR 10.

### 1.3.4 Mampostería no reforzada

Este es el tipo de sistema se utiliza unidades de mampostería, unidas entre sí por medio de mortero de pega, este sistema no cumple las cuantías mínimas de refuerzo (generalmente no cuenta con algún tipo de refuerzo) establecidas, para ser considerada como mampostería parcialmente reforzada. (Capítulo D.9 de la NSR-10, 2010), Se pueden encontrar muros con bloques macizos sin perforaciones, véase (Figura 1-10), (Figura 1-11).

Figura 1-10 Mampostería no reforzada con unidades macizas. fuente (Elaboración propia)

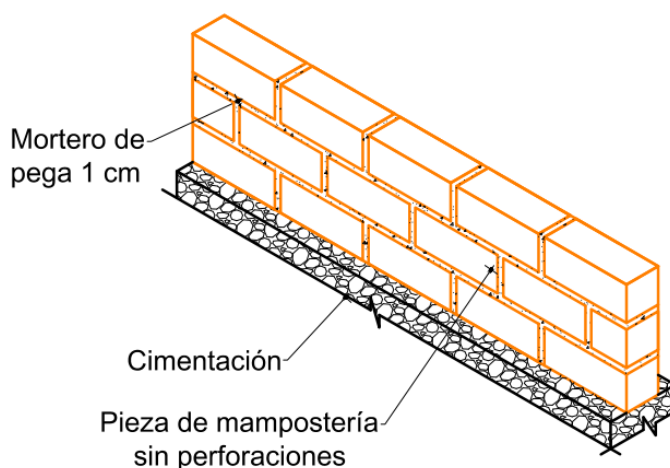
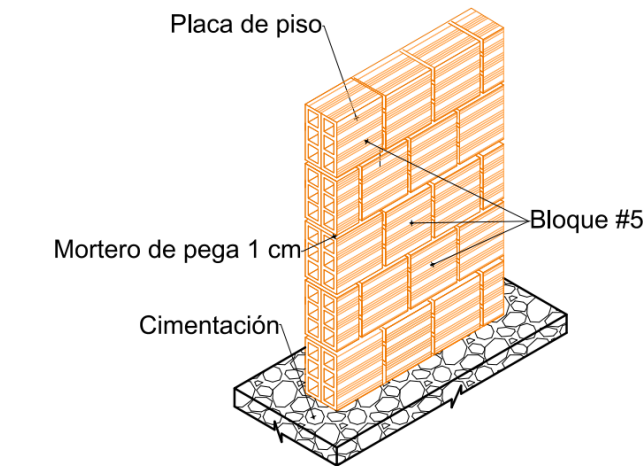


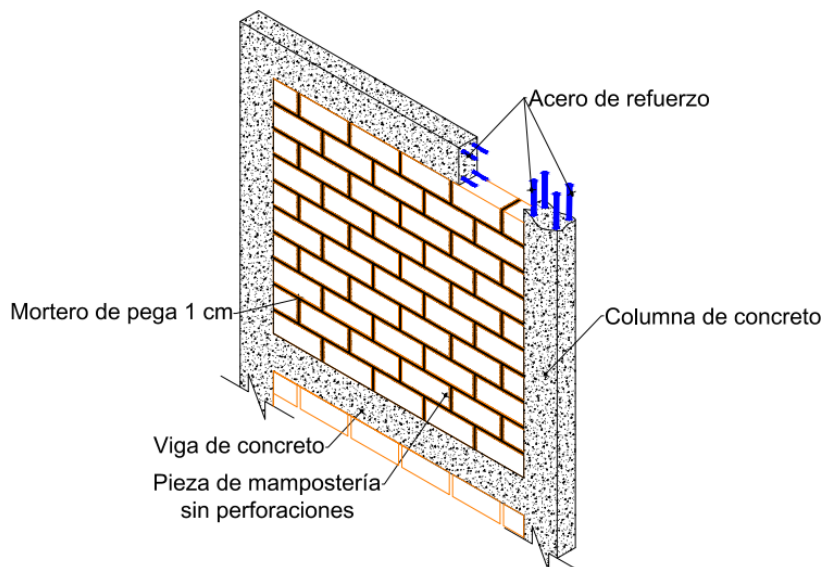
Figura 1-11 Mampostería no reforzada con unidades de perforación horizontal. fuente (Elaboración propia)



### 1.3.5 Mampostería de muros confinados

Estas unidades utilizan piezas de mampostería unidas por medio de mortero, con elementos generalmente de concreto reforzado, construidos alrededor del muro para proporcionar un confinamiento. (Capítulo D.10 de la NSR-10, 2010), véase (Figura 1-12).

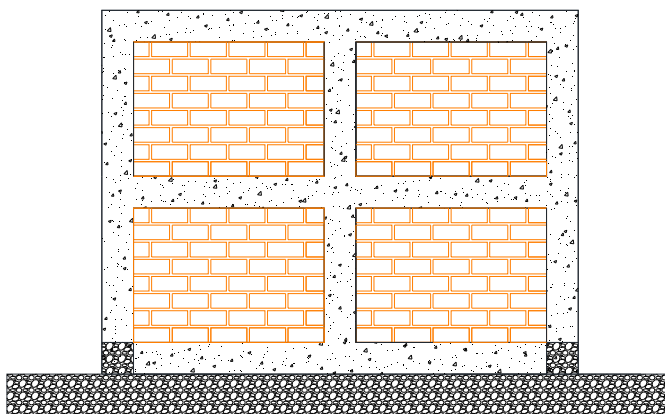
Figura 1-12 Mampostería de muros confinados. fuente (Elaboración propia)



### 1.3.6 Mampostería de muros diafragma

Son muros construidos dentro de una estructura de pórticos, que restringen el desplazamiento libre bajo cargas horizontales. ( Capitulo D.11 de la NSR-10, 2010), véase (Figura 1-13).

Figura 1-13 Mampostería de muros diafragma. fuente (Elaboración propia)



## 1.4 Tipologías de falla en muros de mampostería

Las fallas en mampostería son principalmente por acciones de corte y flexión, sin embargo, se pueden presentar de una manera menos probable fallas ante solicitaciones de carga axial. (Díaz, 2003). A continuación, se explicarán brevemente el comportamiento de la mampostería ante diferentes solicitaciones:

- Cuando los esfuerzos de compresión son muy altos, (Suaréz, 2004), y las unidades de mampostería son de muy mala calidad, o están desgastadas por intemperismo aparecen grietas verticales en las unidades, seguido del aplastamiento en las unidades.
- Ante solicitaciones de flexión, cuando se alcanza el esfuerzo resistente a tensión de las unidades de mampostería y no se tiene ningún tipo de acero de refuerzo capaz de resistir esta tensión las unidades se fisuran induciendo la falla del conjunto.

- Ante esfuerzos de corte, si los muros tienen una alta relación longitud / altura y un diseño inadecuado aparecen grietas escalonadas a través del mortero de pega, donde hay dos efectos importantes: el comportamiento frágil de las unidades a tracción y la debilidad inducida por las juntas de mortero. (Torres, 2009)

Los modos de fallas más comunes se presentan por cortante o por flexión. Las fallas por cortante son el resultado de la combinación de grietas de tensión diagonal en las unidades y grietas a lo largo del mortero de pega. Debido a esto, pueden ocurrir varios tipos de daños dependiendo de la magnitud relativa de los esfuerzos axiales.

- Fallo por fricción cortante. Se presenta cuando los esfuerzos de compresión son bajos y dan lugar a esfuerzos cortantes que generan deslizamiento en las juntas horizontales.
- Fallo por tensión diagonal. Se genera cuando se tienen esfuerzos de compresión moderados, la resistencia por cortante de las juntas se incrementa debido a la existencia de esta fuerza y la falla se da por una combinación de los esfuerzos de tracción y compresión, a los cuales se somete el muro véase (Figura 1-14).

Figura 1-14 Falla debido a tensión diagonal. Fuente (Propia)





Se debe tener presente que estos dos tipos de falla, por fricción cortante o tensión diagonal, son frágiles y deben evitarse a toda costa. Por otro lado, las fallas de flexión son hasta cierto punto dúctiles, siempre y cuando existe acero de refuerzo en el muro (Torres, 2009). En caso de no ser así, la falla que se presenta es frágil y por esto es necesario reforzarlo.

## 1.5 Muros de perforación horizontal con bloque #5

Los muros de mampostería simple, con unidades de perforación horizontal, pueden estar construidas por unidades de arcilla, como el bloque #5 de perforación horizontal, (véase Figura 1-15 y Figura 1-16 ), y mortero de pega.

Figura 1-15  
Dimensiones Bloque  
numero 5. Fuente (   
Elaboracion Propia)

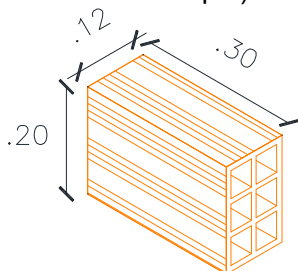


Figura 1-16 Fotografía bloque número 5 Fuente:  
(<https://www.santafe.com.co/divisorios/?category=perforacion-horizantal>)



El arreglo de los muros tiene una configuración típica véase ( Figura 1-17 Figura 1-18 y Figura 1-19), donde generalmente se deja por norma entre, 1.0 y 1.5 cm de mortero de pega y una hilera de bloques se traslapa con la siguiente, de modo que la pega vertical no es continua o como se le denomina en el medio, aparejo trabado.

Figura 1-17 Configuración típica, muro de mampostería con bloque de perforación horizontal - Fuente: (Elaboración propia)

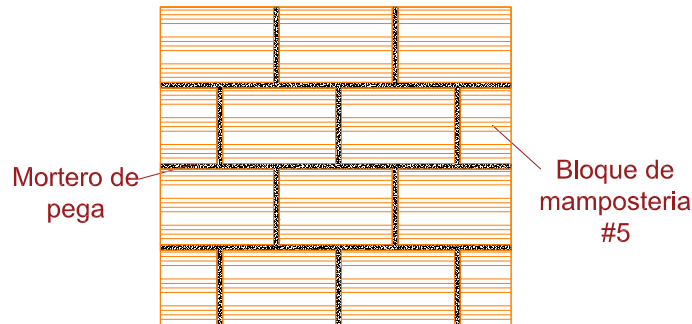


Figura 1-18 Arreglo típico 1. Fuente (Propia)



Figura 1-19 Arreglo típico 2. Fuente (Propia)



El constante estudio y uso de muros de la mampostería como sistema estructural, ha llevado a descubrir aspectos positivos tales como su buena resistencia al fuego, el buen aislamiento térmico, acústico, ventajas estéticas y urbanísticas entre otros. Sin embargo, también se ha podido comprobar la inherente fragilidad de la mampostería no reforzada o simple ya que posee nula ductilidad, entendida esta como la capacidad de disipar energía (Hamburger, 2006). Por esta razón, los muros de mampostería simple presentan un pobre desempeño frente a eventos sísmicos.

Al igual que el concreto, la mampostería simple presenta una alta resistencia ante esfuerzos de compresión, pero su comportamiento ante esfuerzos de tensión y

corte es pobre. Por esta razón, se introduce acero cuya función es resistir los esfuerzos que se presentan en los diferentes regímenes de carga.

Adicionalmente, el acero dota al muro de una mayor capacidad para disipar energía, desarrollando mayores deformaciones sin que exista una falla instantánea, lo que permite a la estructura redistribuir las cargas desde una zona dañada a otras adyacentes sin colapso (NSR-10, 2010).

## 2. Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología que se siguió en el presente estudio. Primero se presentan los ensayos de caracterización de los materiales utilizados para la construcción de los muretes, después se explica la construcción de estos y posteriormente los ensayos realizados. Se determinó el desempeño del reforzamiento propuesto, que consiste en la colocación en una sola cara de malla electrosoldada embebida en pañete con fibras de acero, al comparar el comportamiento de muros no reforzados, (Figura 2-1 y Figura 2-2), y reforzados (Figura 2-3 y Figura 2-4) por medio de ensayos de compresión y tensión diagonal.

Figura 2-1. Muros típicos sin reforzamiento. Fuente (Elaboración propia).

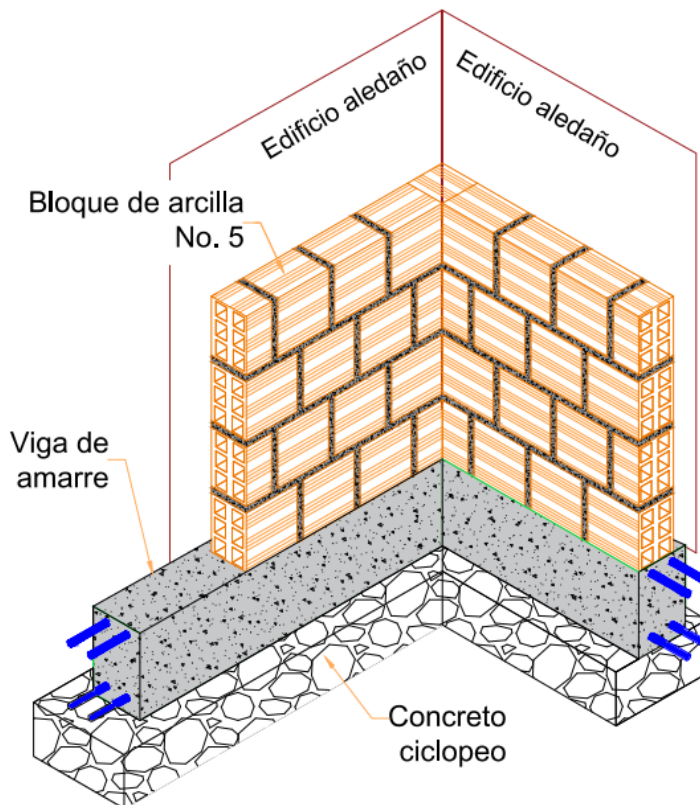


Figura 2-2 Detalle muro sin refuerzo. Fuente (Elaboración propia).

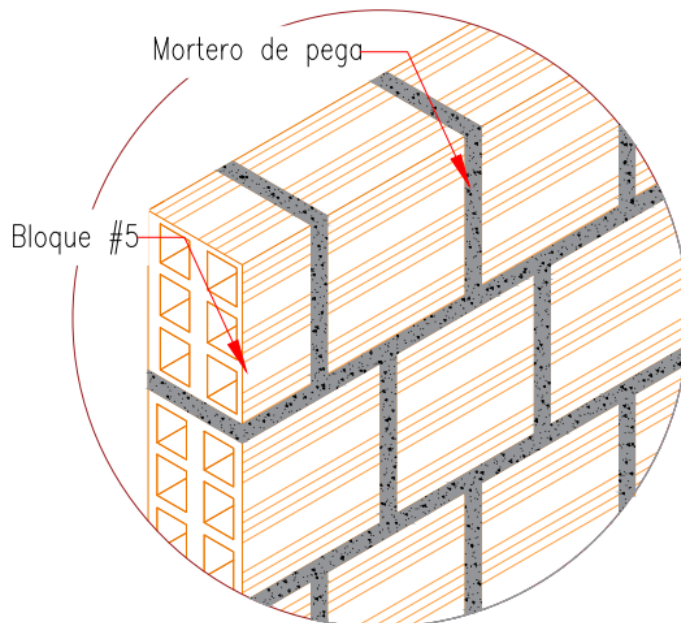


Figura 2-3 Reforzamiento propuesto. Fuente (Elaboración propia).

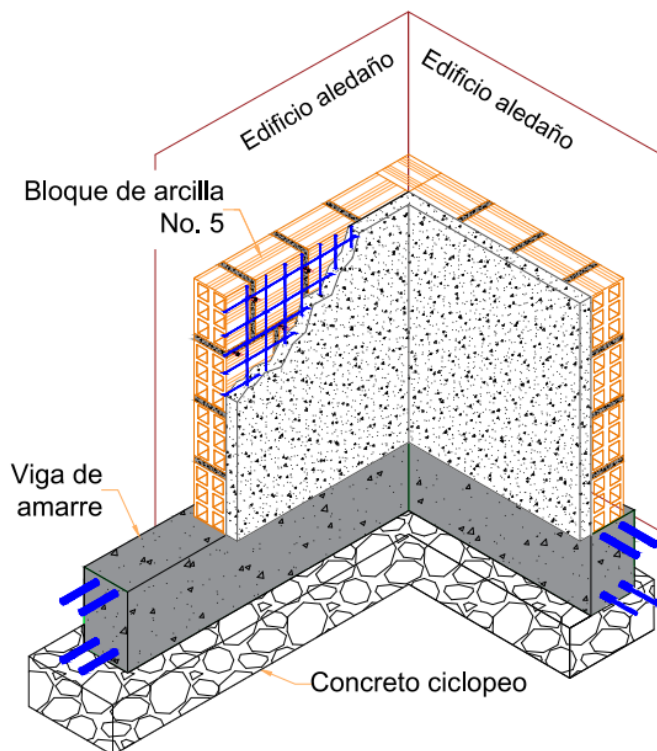
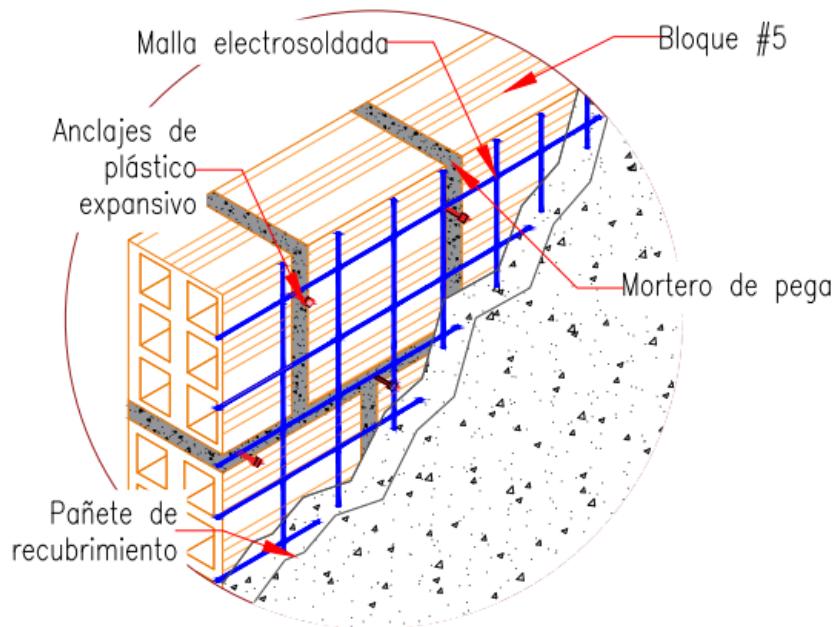


Figura 2-4 Detalle refuerzo de muro. Fuente (Elaboración propia).



## 2.1 Materiales

Para la construcción de los muretes, se determinaron las propiedades mecánicas de las unidades de mampostería y las cantidades de cemento, agregado y agua para la elaboración del pañete y el mortero de pega.

### 2.1.1 Unidades

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en unidades de mampostería, siguiendo la norma, NTC – 4017:2018 “Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla” los cuales cumplieron con los valores mínimos de resistencia para unidades de arcilla especificados en la NTC – 4205:2009 “Resistencia unidades de arcilla (Tabla 2).

Tabla 2. Resumen ensayos sobre unidades de mampostería

<b>Ensayos Realizados</b>		
<b>Unidades de mampostería</b>	5 unidades de mampostería sometidas a compresión inconfiada	NTC – 4017:2009

### 2.1.2 Mallas de acero

Se usó la NTC – 5806:2019 “Requisitos para mallas electrosoldadas” donde se especifican las propiedades mecánicas que deben cumplir la malla electrosoldada para uso en el concreto. Se determinó la resistencia a la tracción de la malla usando los lineamientos dados en la NTC – 3353:2019 “Ensayos mecánicos para productos de acero”, para esto se ensayaron 4 especímenes de grafiles de la malla electrosoldada de 4 mm de diámetro;

El alargamiento del acero en los ensayos de tensión se midió por medio de un extensómetro para que junto con los valores de esfuerzo se pudiera determinar el módulo de elasticidad de los grafiles.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los ensayos realizados a las mallas electrosoldadas y la norma NTC seguida.

Tabla 3 Resumen de ensayos en mallas electrosoldadas. Fuente (Elaboración propia).

<b>Ensayos Realizados</b>		
<b>Grafiles de Malla electrosoldada</b>	4 muestras sometidas a tensión	NTC- 3353:2019

### 2.1.3 Ensayo de morteros

La dosificación del mortero de pega, se realizó siguiendo lo establecido en la NTC-3546-A4:2003 “Dosificación material cementante (morteros)”, mientras que para el contenido de agua se usó la NTC-3546-A5:2003 “Dosificación material cementante

(morteros)". Una vez realizada la dosificación, se determinó la resistencia a la compresión de este mortero siguiendo los lineamientos de la NTC-3546-A7:2003 "Resistencia a la compresión de morteros".

Se fundieron y almacenaron 3 cubos del mortero de pega siguiendo las indicaciones de la NTC 3546:2003 "Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada" los cuales se ensayaron a compresión a los 28 días, para determinar la resistencia del mortero de pega.

La dosificación del mortero de pega consistió en una parte de cemento por tres partes de arena en términos de volumen. La razón de esta dosificación obedece al tratar de asemejar, la mezcla de mortero elaborada en el laboratorio con la que podría encontrarse en una vivienda fabricada con bloque de mampostería #5.

Debido a esto y considerando que el objetivo de la tesis es reforzar una estructura ya existente y no proponer una alternativa de construcción nueva, para la determinación del mortero de pega no se tomaron los valores de resistencia de morteros de pega estipulados en la NSR-10 ni en la NTC-3329:2004 "Especificaciones del mortero de pega".

Con relación a la dosificación del material cementante y contenido de agua para el pañete se utilizó el mismo criterio que para el mortero de pega. Sin embargo, se realizaron ensayos de fluidez siguiendo la NTC-111:2018 "Ensayo de fluidez" con el fin de lograr, no solo valores de resistencia adecuados, sino también una adecuada manejabilidad de mezcla, de acuerdo con los requisitos de la NSR-10.

Se realizaron dosificaciones diferentes, con el fin de obtener la fluidez y resistencia a la compresión adecuadas para los morteros destinados al pañete. Una vez fundidos y marcados los cilindros y cubos de mortero (Imagen 1), pasado el tiempo de curado inicial y una vez desmoldado los especímenes, se sumergieron estas muestras, en una piscina de curado durante 28 días (Imagen 2).



Imagen 1 Registro fotográfico de cilindros y cubos antes de ensayo. Fuente (Elaboración propia).

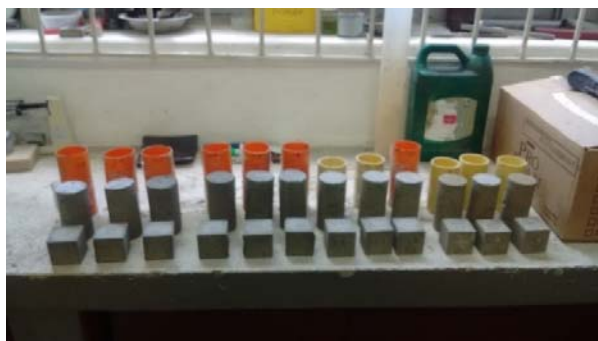


Imagen 2 Registro fotográfico del curado de los especímenes de pañete. Fuente (Elaboración propia).



El resumen de dosificaciones puede verse en Tabla 4. Las dimensiones de los cilindros fueron de 150 mm de alto x 75 mm de diámetro y las de los cubos de 50 mm x 50 mm x 50 mm.

Tabla 4 Resumen dosificaciones mortero de pañete

Número de muestras	Dosificación	NTC
3 cilindros	1:2	NTC-111:2018 NTC-3546-A7:2003 NTC – 504:1995 NTC – 3708:2019 NTC – 722:2000
3 cubos		
3 cilindros	1:3	
3 cubos		
3 cilindros	1:4	
3 cilindros		
3 cilindros	1:5	
3 cubos		

Una vez fundidas las probetas para cada una de las cuatro mezclas de mortero de pañete se determinó su resistencia a la compresión siguiendo los lineamientos de la NTC-3546-A7:2003 “Resistencia a la compresión de morteros”. Por cada dosificación se ensayaron a los 28 días tres cubos y tres cilindros. El refrentado de los especímenes se realizó según la NTC – 504:1995 “Aparatos, materiales y procedimientos para el refrentado de cilindros de concreto” y NTC – 3708:2019 “Requisitos para la utilización del refrentado en especímenes de concreto”.

Para determinar el aporte de las fibras de acero<sup>1</sup> en la mezcla de mortero se realizaron ensayos de tensión indirecta en cilindros siguiendo los lineamientos de la NTC – 722:2000 “Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto”. La dosificación de las fibras de acero fue de 35 kilogramos de fibras por cada metro cúbico de mortero.

La Tabla 5, presenta el resumen de ensayos realizado sobre los morteros.

Tabla 5 Resumen ensayos sobre mortero. Fuente (Elaboración propia).

	<b>Ensayos Realizados</b>	<b>NTC</b>
<b>Mortero de pega</b>	3 cubos sometidos a compresión inconfiada	NTC-3546-A7:2003
<b>Mortero de pañete</b>	12 cubos sometidos a compresión inconfiada	NTC-3546-A7:2003
	12 cilindros sometidos a tensión indirecta	NTC – 722:2000
<b>Ensayos de fluidez</b>	5 ensayos de fluidez, 4 ensayos para el mortero de pañete y 1 ensayo de fluidez en el mortero de pega.	NTC-111:2018

<sup>1</sup> Sika Fiber CHO6535NB

## 2.2 Construcción muretes de ensayo

El proceso de construcción de muretes se dividió en las etapas que se describen a continuación. En la primera etapa se fundieron ocho muretes ajustando el espesor del mortero de pega, para lograr la altura y longitud deseada véase Figura 2-5, para luego dejarlos fraguar durante veinte días. Después del tiempo inicial de fraguado, en el paso 2, en uno de los lados del murete, se insertaron anclajes expansivos de acero de 3" de longitud por 3/16" de diámetro Figura 2-6 de la manera mostrada en el apartado anterior. A continuación, en el paso 3, se recubrió este lado con una capa de 10 mm de mortero sin fibras de acero y se dejaron fraguar los muretes por ocho días más véase Figura 2-7.

Figura 2-5 Paso 1 armado de muros. Fuente (Propia)

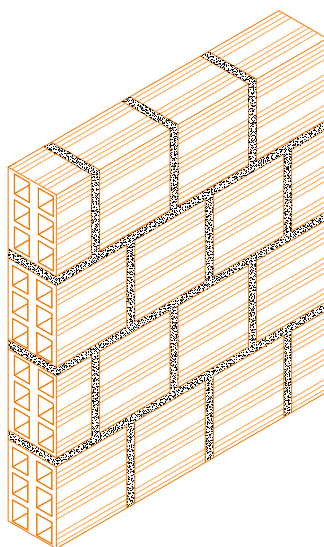


Figura 2-6 Paso 2 colocación de anclajes de plástico expansivos. Fuente (Propia) (Elaboración propia).

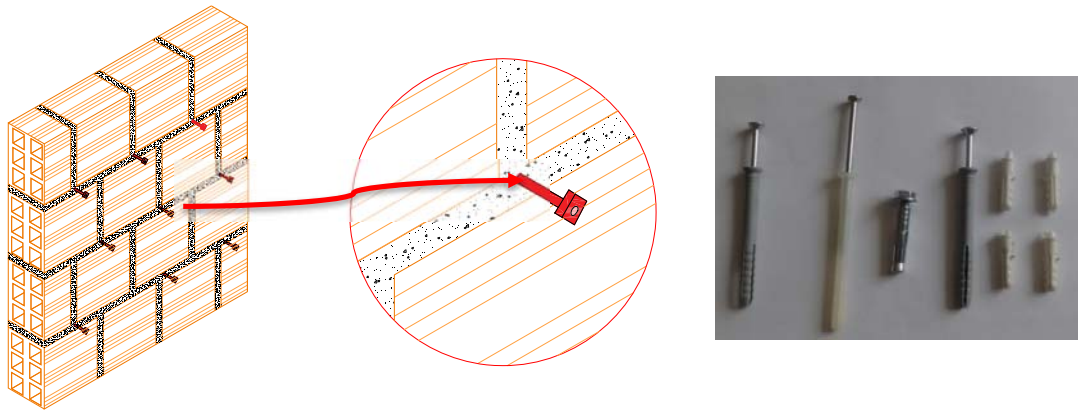
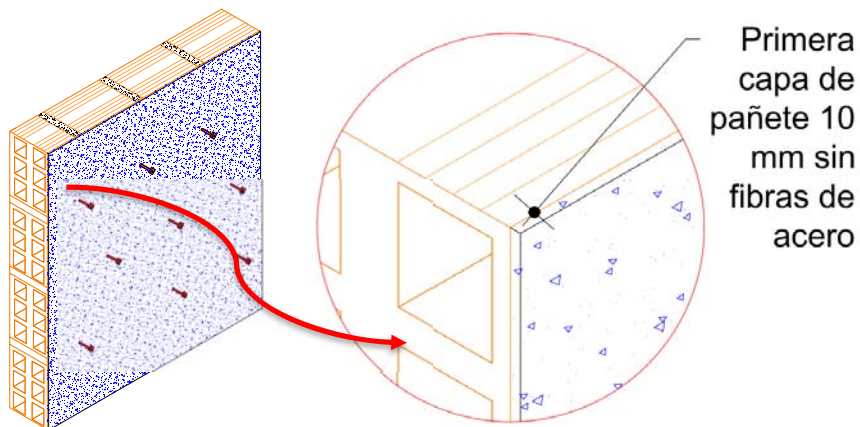


Figura 2-7 Paso 3 Colocación de la primera capa de pañete sin fibras de acero. Fuente (Propia)



El paso 4 consistió en el armado del reforzamiento en los muretes. En esta etapa se cortó, instaló y amarró la malla electrosoldada a los anclajes plásticos instalados con anterioridad y se aplicó una capa de 10 mm de pañete con fibras de acero véase Figura 2-8. En el paso 5 se colocó una última capa de 30 mm de pañete con fibras de acero (Figura 2-9) y se dejó fraguar durante 28 días.

Figura 2-8 Paso 4 colocación de malla y segunda capa de pañete. Fuente (Propia)

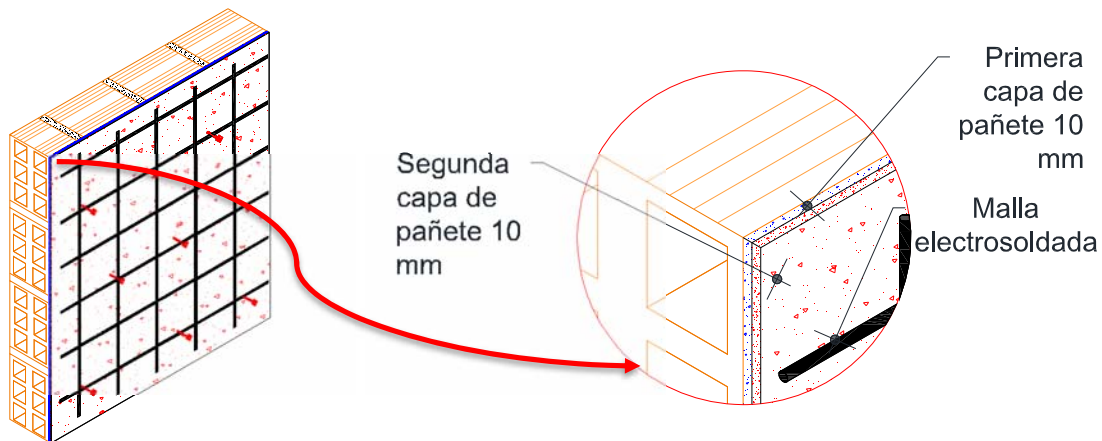
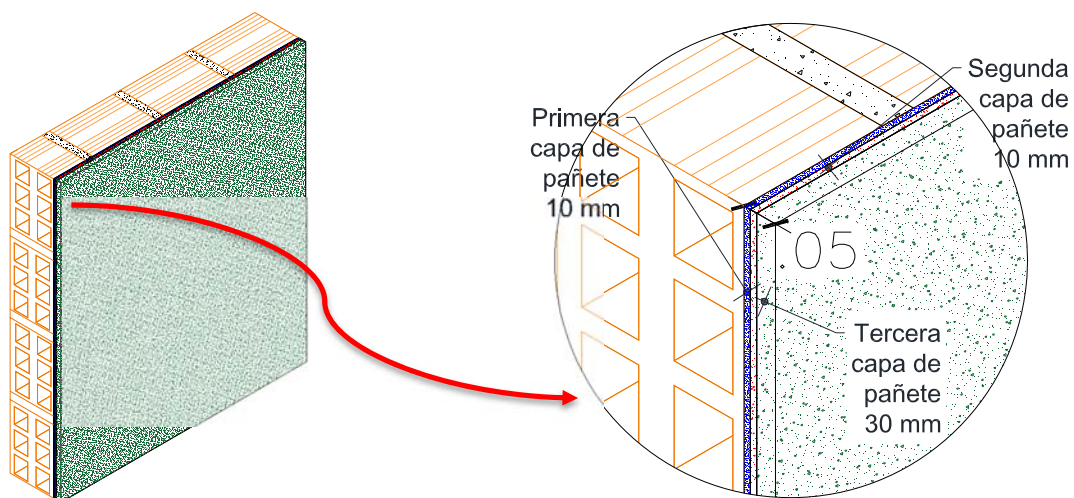


Figura 2-9 Paso 5 (Ultimo) colocación de la tercera capa de pañete fuente (Propia)



Los muretes una vez terminados quedaron con dos caras muy diferentes; una con refuerzo y mortero, que en adelante se llamará “cara con malla” y la otra sin ningún tipo de intervención que en adelante se llamará “cara sin malla”.

## 2.3 Ensayos muros de mampostería

### 2.3.1 Compresión

Para el ensayo de muros de mampostería solicitados ante cargas estáticas de compresión, se usó el método A, descrito en la NTC-3495:2003 “Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de prismas de mampostería”. En el lado reforzado (Figura 2-10), se instalaron anclajes de plástico expansivos, usando un taladro percutor que permitieron fijar láminas de aluminio y acero para la instalación del comparador de carátula. Las platinas y ángulos usados en este ensayo, pueden verse en detalle en la Imagen 3 e Imagen 4, Las platinas de aluminio tienen una dimensión de 2”x2”x1/8” y los ángulos son de 4”x4”x1/8”.

Figura 2-10 ensayo a compresión con malla. Fuente (Elaboración propia).

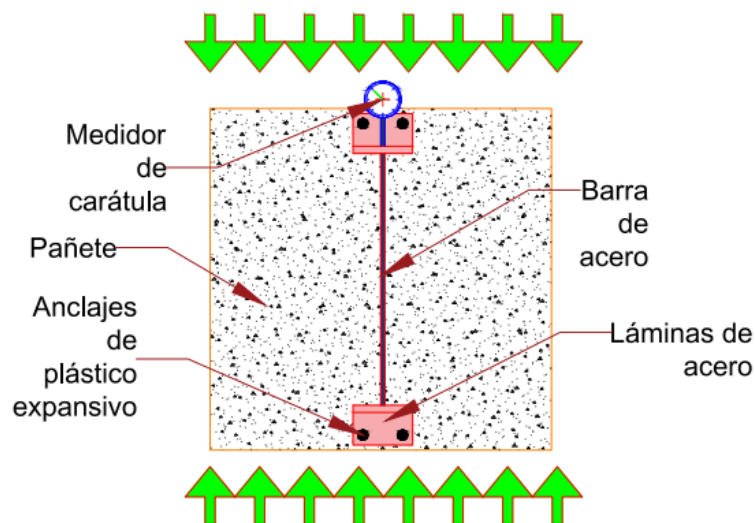


Imagen 3. Platinas y ángulos usados para fijar los comparadores vista 1. Fuente. (Elaboración propia).

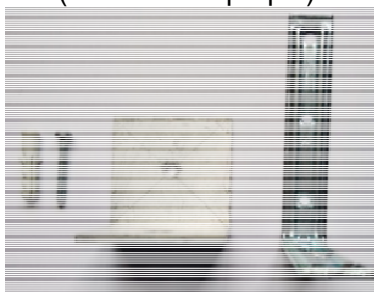
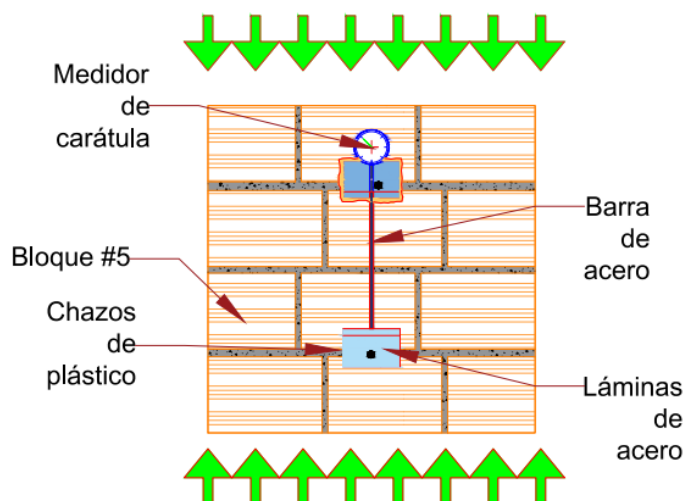


Imagen 4. Platinas y ángulos usados para fijar los comparadores vista 2. Fuente. (Elaboración propia).



En la cara sin pañete (Figura 2-11), las láminas de acero se fijaron de la misma manera que en la cara con pañete, sin embargo la ubicación de estas perforaciones tenía que hacerse solo en las partes en las cuales existía mortero de pega, para lograr mantener la integridad de las unidades de mampostería y tener un anclaje adecuado de los anclajes expansivos.

Figura 2-11 Ensayo a compresión cara sin malla. Fuente (Elaboración propia).



Se aplicó una capa de cal en cada una de las caras de los muretes, para poder visualizar de mejor forma las fisuras y posibles problemas en el desarrollo del ensayo.

Adicionalmente, se tomaron fotografías a lo largo del ensayo para registrar el efecto de la carga en el murete y el desarrollo de grietas.

Para cargar el murete se utilizó un cilindro hidráulico con capacidad de 50 toneladas. Además con el fin de lograr una acción relativamente uniforme en la cara cargada del murete, se colocó entre el murete y el cilindro de carga, un bloque de madera y dos perfiles IPE soldados en sus aletas y con una sección del perfil rellena con concreto de altas especificaciones, véase Figura 2-12 e Imagen 5.

Figura 2-12 Esquema soldado - perfiles metálicos IPE 200. Fuente (Elaboración propia).

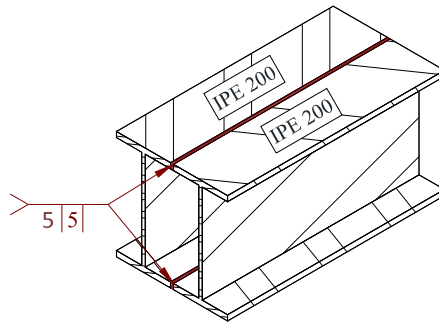


Imagen 5. Esquema de montaje ensayo a compresión en muretes reforzados. Fuente (Elaboración propia).



Adicionalmente se utilizó una rótula disipadora de momentos, para garantizar aplicación uniforme de carga, véase Imagen 6.



Imagen 6. Rótula de carga, ensayo de compresión. Fuente (Elaboración propia).



La identificación de las lecturas para los especímenes sometidos a compresión fue la siguiente.

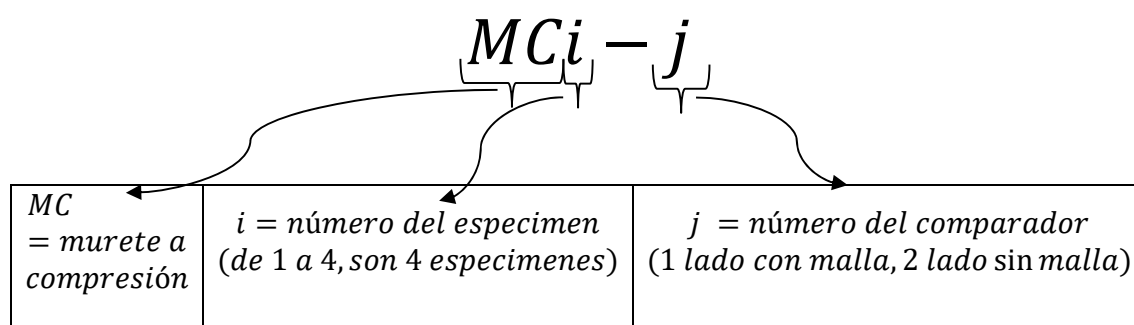
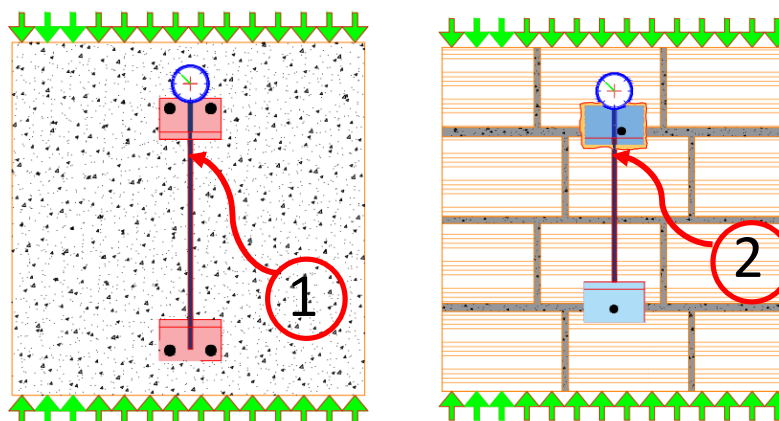


Figura 2-13. Esquema de ubicación y numeración de comparadores de carátula en el ensayo a compresión. Fuente (Elaboración propia).



De esta forma la lectura identificada con MC3-2, significa, “Muro a compresión número 3 – comparador en el lado sin malla”.

### 2.3.2 Tensión diagonal.

Para determinar la resistencia a tensión diagonal, se utilizó el procedimiento descrito en la NTC-4925:2001 “Prefabricados de concretos, método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción – cortante – en muretes de mampostería”, para prefabricados de concreto y muretes de mampostería. El montaje realizado se puede ver en la Figura 2-14 y Figura 2-15. Por la cara sin malla (Figura 2-14), los ángulos o láminas de acero se fijaron mediante anclajes expansivos, colocados en el mortero de pega y luego se instaló el medidor de carátula. En la cara con malla (Figura 2-15), se instalaron los comparadores de carátula de manera similar que en la cara sin malla.

Figura 2-14 Tensión diagonal cara sin malla. Fuente (Elaboración propia).

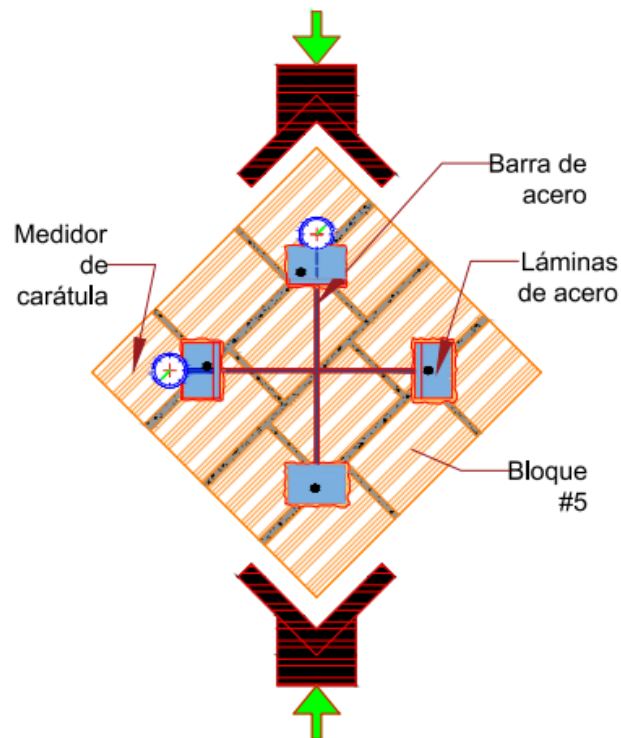
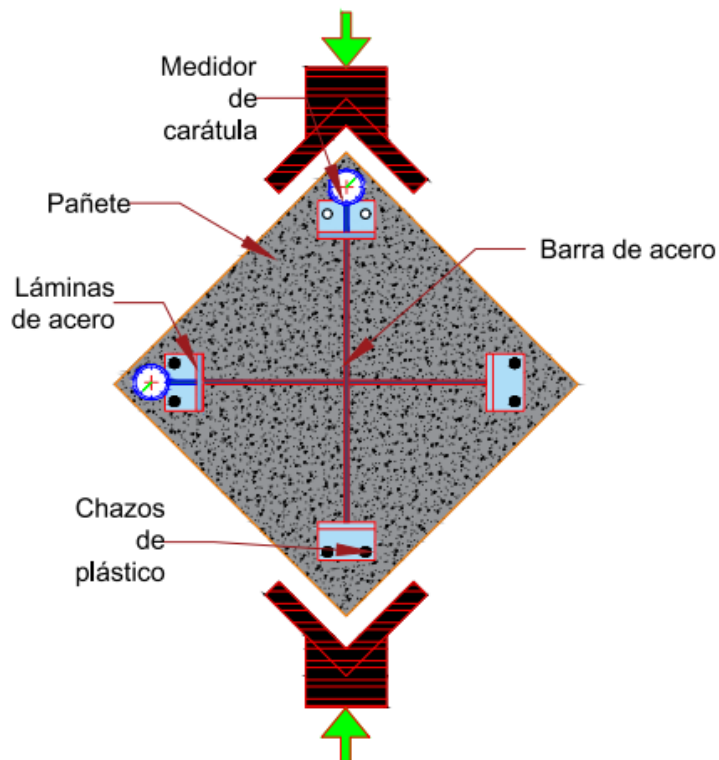


Figura 2-15 Tensión diagonal cara con malla. Fuente Fuente (Elaboración propia).



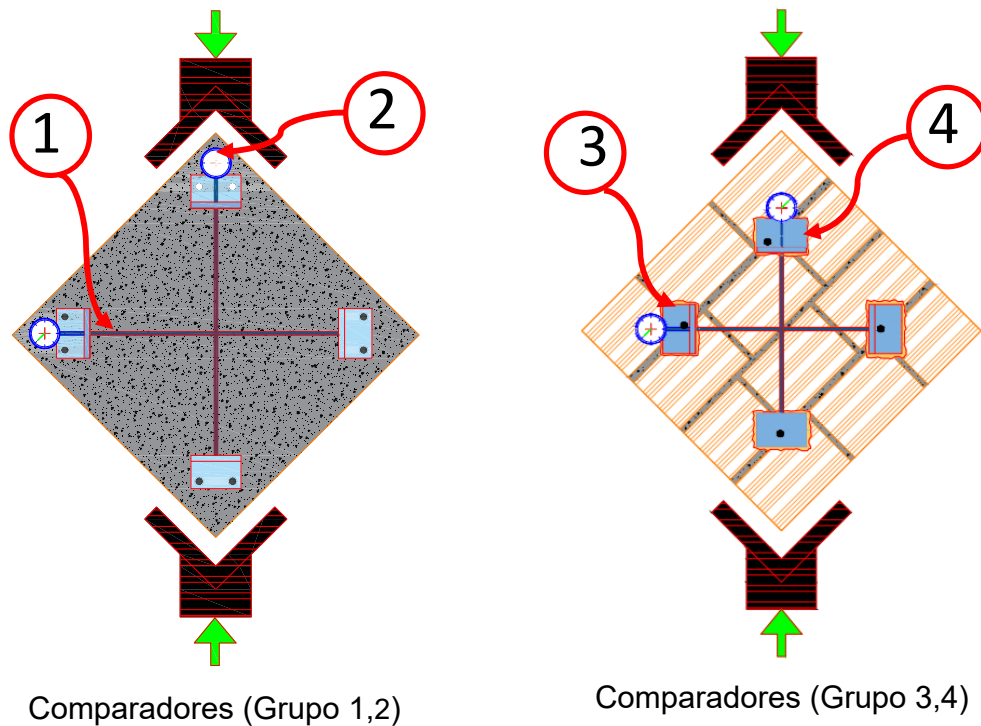
Para el ensayo de tensión diagonal, se usó la siguiente nomenclatura para la identificación de las lecturas de los especímenes.

$$MTDi - j$$

<i>MTD</i> = murete a tensión diagonal	<i>i</i> = número del espécimen (de 1 a 3, de 3 especímenes)	<i>j</i> = número del comparador (1 y 2 lado con malla, 3 y 4 lado sin malla)
--	---	--

En la Figura 2-16 se observa la manera como fueron ubicados los comparadores de carátula en los muretes.

Figura 2-16. Esquema de ubicación y numeración de comparadores de carátula, ensayo de tensión diagonal. Fuente (Elaboración propia).



De esta manera una lectura de un muro identificado con MTD2-1,2, significa, "Muro a tensión diagonal número 2 – grupo de comparadores 1 y 2 cara con malla".

### 2.3.3 Disposiciones varias

Al momento de realizar los ensayos de tensión diagonal y compresión, colocó protección alrededor de los muretes (barras de acero y malla electrosoldada) para evitar que fragmentos de ladrillo pudieran generar daños o causar heridas.

En la Tabla 6 se puede ver el resumen de los diferentes ensayos realizados en los muretes.

Tabla 6 Resumen ensayos muretes, tensión diagonal y compresión. Fuente (Elaboración propia).

<b>Ensayos Realizados</b>		
<b>Muretes a tensión diagonal</b>	3 muretes sometidos a tensión diagonal	NTC-4925:2001
<b>Muretes a compresión</b>	4 muretes sometidos a compresión	NTC-3495:2003

## 2.4 Resumen normas utilizadas

En la Tabla 7 se encuentra el resumen de normas utilizadas para desarrollar los diferentes ensayos.

Tabla 7 resumen de Normas Utilizadas. Fuente (Elaboración propia).

<b>Ensayos</b>	
<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
<b>NTC – 4017:2018</b>	Resistencia a la compresión de cilindros y cubos de mortero.
<b>NTC – 922:1975</b>	Requisitos para ensayos de unidades de mampostería
<b>NTC – 4205:2009</b>	Resistencia unidades de arcilla
<b>NTC - 3546 - A4:2003</b>	Dosificación material cementante (morteros)
<b>NTC - 3546 - A5:2003</b>	Dosificación contenida de agua (morteros)
<b>NTC - 3546 - A7:2003</b>	Resistencia a la compresión de morteros
<b>NTC – 3329:2004</b>	Especificaciones del mortero de pega
<b>NTC – 3495:2003</b>	Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de prismas de mampostería
<b>NTC – 4925:2001</b>	Prefabricados de concretos, método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción – cortante – en muretes de mampostería
<b>NTC – 5806:2019</b>	Requisitos para mallas electrosoldadas
<b>NTC – 3353:2019</b>	Ensayos mecánicos para productos de acero numerales 5 al 13 (tracción)
<b>NTC – 3708:2019</b>	Requisitos para la utilización del refrentado en especímenes de concreto

<b>NTC – 504:1995</b>	Aparatos, materiales y procedimientos para el refrentado de cilindros de concreto
<b>NTC – 3546:2003</b>	Métodos de ensayo para determinar la evaluación en laboratorio y en obra, de morteros para unidades de mampostería simple y reforzada.
<b>NTC – 111:2018</b>	Ensayo de fluidez
<b>NTC – 3658:2018</b>	Resistencia a la tracción indirecta en probetas de concreto
<b>ASTM - C496/C496M - 17</b>	Método de prueba estándar para Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de concreto
<b>ASTM E178-08</b>	Practica estándar para el manejo de datos atípicos (outlying observations)
<b>NTC – 722:2000</b>	Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto

### 3. Resultados y análisis

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados. Se presentan gráficas, tablas y en algunos de estos ensayos se muestra el registro fotográfico de los ensayos, además se realiza el análisis de estos resultados. Los resultados obtenidos de los muretes reforzados sometidos a carga axial y tensión, fueron comparados con los resultados obtenidos en ensayos similares, pero con muretes sin ningún tipo de refuerzo, estos ensayos fueron realizados en la tesis de maestría “*Determinación de las características mecánicas de muretes de mampostería simple reforzados con malla de acero y conectores transversales sometidos a carga axial y tensión diagonal*” (Sandoval, 2020).

#### 3.1 Unidades de mampostería

En la Tabla 8, se encuentran los resultados del ensayo de compresión inconfiada, sobre unidades de mampostería (bloque #5), el fabricante entrega un valor de resistencia de 2 Mpa. En el estudio se encontró a partir de los ensayos un valor promedio superior, descartando uno de los resultados debido a que fue un valor alto atípico. En Imagen 7, Imagen 8, Imagen 9 e Imagen 10, se muestra el modo de falla y resultados numéricos de las unidades, que se caracteriza por ser extremadamente frágil sin desarrollo de grietas. Se descartó el espécimen 3 ya que su valor no sigue la tendencia general del resto de las unidades de mampostería. Los resultados registrados y cálculos se presentan en el anexo A).

Tabla 8 Resistencia a compresión en unidades. Fuente (Elaboración propia).

Unidad	Espécimen	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
Bloque #5	1	25.6	2.56	2.72
	2	27.3	2.73	
	3 (valor descartado)	62.9	6.29	
	4	28.3	2.83	
	5	27.9	2.79	

Imagen 7. Ensayo compresión unidades de mampostería – espécimen 1. Fuente (Elaboración propia).

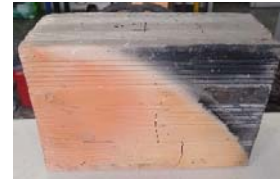


Imagen 8. Ensayo compresión unidades de mampostería – espécimen 2. Fuente (Elaboración propia).



Imagen 9. Ensayo compresión unidades de mampostería – espécimen 4. Fuente (Elaboración propia).



Imagen 10. Ensayo compresión unidades de mampostería – espécimen 5. Fuente (Elaboración propia).



### 3.2 Mallas electrosoldadas

En la Tabla 9, se presenta el resultado de los ensayos a tensión en los grafiles de la malla. Un aspecto interesante de este ensayo es que todos los especímenes fallaron cerca al punto de unión de la cruz de la malla, es decir en un punto cercano



a la junta entre dos grafiles, puede verse esto en la Imagen 11, Imagen 12 e Imagen 13, (los registros y cálculos se presentan en el anexo A).

Tabla 9 Ensayo a tensión de la malla electrosoldada. Fuente (Elaboración propia).

Nombre	FUERZA MAXIMA	FUERZA MAXIMA	Esfuerzo máximo
Unidad	N	Kg	MPa
malla 1	8592.18	875.86	680.34
malla 2	9165.29	934.28	759.42
malla 3	9499.36	968.33	726.58
malla 4	8801.70	897.22	707.47

Imagen 11 Ensayo de tensión en grafiles de malla electrosoldada espécimen 1. Fuente (Elaboración propia).

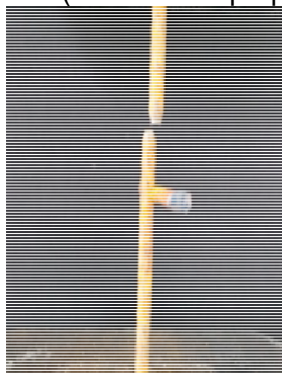


Imagen 12 Ensayo de tensión en grafiles de malla electrosoldada espécimen 2. Fuente (Elaboración propia).

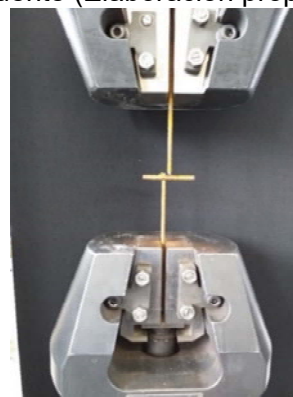


Imagen 13 Ensayo de tensión en grafiles de malla electrosoldada espécimen 3. Fuente (Elaboración propia).



Se encontraron valores de resistencia última a tensión en los grafiles, de 718.45 MPa en promedio, alcanzando un máximo valor de hasta 759 MPa con un módulo de elasticidad de 201068 MPa.

### 3.3 Morteros de pega.

#### 3.3.1 Compresión en el mortero de pega

En la Tabla 10, se presentan los resultados de compresión en el mortero. La resistencia promedio fue de 10.9 MPa, (los cálculos completos están en el anexo A).

Tabla 10 Esfuerzo máximo a compresión mortero de pega. Fuente (Elaboración propia).

<b>Dosificación 1:3</b>					
<b>Cubos</b>	<b>Espesor</b>	<b>Anchura</b>	<b>Altura</b>	<b>Fuerza</b>	<b>Esfuerzo máximo</b>
	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>kN</b>	<b>MPa</b>
<b>Cubo 1</b>	0.05	0.05	0.05	27.5	11.0
<b>Cubo 2</b>	0.05	0.05	0.05	23.0	9.2
<b>Cubo 3</b>	0.05	0.05	0.05	31.4	12.6
<b>Promedio</b>					10.9

#### 3.3.2 Fluidez en el mortero de pega

Para cumplir la fluidez necesaria para mezclas de mortero de pega, se mantuvo un valor de entre un 100% y un 110%, los valores de fluidez pueden verse en la Tabla 11.

Tabla 11 Fluidez del mortero de pega. Fuente (Elaboración propia).

<b>fecha de fundida</b>	<b>26/09/2018</b>
<b>Hora de fundida</b>	11:50:00 a. m.
<b>Dosificación</b>	1: 3
	260
<b>Diámetro final de pasta (mm)</b>	260
	270
	270
<b>Porcentaje (%)</b>	106

## 3.4 Mortero de pañete

### 3.4.1 Compresión mortero para pañetes sin fibras de acero

La resistencia a compresión de las diferentes mezclas de mortero de pañete pueden verse en la Tabla 12, las muestras con dosificaciones en las cuales había una mayor proporción de agua y arena, presentaban comportamientos pobres desde un punto de vista mecánico, las mezclas 1:4 y 1:5 fueron las mezclas con el peor desempeño mecánico (el valor de 3.27 MPa en la mezcla 1:5, se descartó al no seguir la tendencia del resto de valores). La mezcla que cumple con un comportamiento óptimo, fue la mezcla 1:2 (una parte de cemento y dos partes de arena), con un valor de 18.95 MPa. En la Imagen 14, se puede ver el modo de falla de uno de los cubos con mezcla 1:2., (los cálculos completos están en el anexo A).

Tabla 12 Resultados ensayo de cubos (pañete) sometidos a compresión. Fuente (Elaboración propia).

Dosificación	Unidad	kgf/mm <sup>2</sup>	MPa	desviación estandar	Promedio
1:2	C1:2_1	1.59	15.92	3.07	18.95
	C1:2_2	2.20	22.05		
	C1:2_3	1.88	18.89		
1:3	C1:3_1	1.72	17.26	3.34	16.65
	C1:3_2	1.96	19.64		
	C1:3_3	1.30	13.05		
1:4	C1:4_1	0.84	8.47	0.65	8.31
	C1:4_2	0.88	8.86		
	C1:4_3	0.75	7.59		
1:5	C1:5_1	0.75	7.55	0.25	7.37
	C1:5_2	0.71	7.19		
	C1:5_3	0.32	3.27 (descartado)		

Imagen 14 Registro fotográfico, ensayo de cubo mezcla 1:2 sometido a compresión.  
Fuente (Elaboración propia).



### 3.4.2 Fluidez mortero de pañete sin fibras de acero

Para el mortero de pañete, también se ajustó la fluidez de la mezcla, en la Tabla 13, se muestran estos resultados. La fluidez de los pañetes se mantuvo dentro del rango de 100% y 110%.

Tabla 13 Resultado ensayos de fluidez sobre los pañetes. Fuente (Elaboración propia).

Fecha de fundida		20/11/2018			
Hora de fundida		11:50	12:20	12:30	01:00
Dosificación		1: 2	1: 3	1: 4	1: 5
Diámetro de pasta (mm)		26.5	25.0	27.0	27.0
		27.0	26.0	27.0	27.0
		26.5	26.0	27.5	27.5
		27.0	25.5	28.0	28.0
porcentaje (%)		107.0	102.5	109.5	109.5

### 3.4.3 Tensión indirecta en el pañete sin fibras de acero

Los valores de tensión indirecta de los cilindros de mortero se pueden ver en la Tabla 14. En la Imagen 15 se aprecia el modo de fallo de uno de los cilindros de mortero, sometidos al ensayo de tensión indirecta, (los cálculos completos están en el anexo A).

Tabla 14 Resultados del ensayo de tensión indirecta sobre los cilindros de mortero (pañete). Fuente (Elaboración propia).

Dosificación	Unidad	kgf	kgf/mm <sup>2</sup>	MPa	Promedio (MPa)
1:2	C1:2 _ 1	2436.74	0.92	9.20	8.82
	C1:2 _ 2	1324.58	0.91	9.10	
	C1:2 _ 3	1651.53	0.81	8.15	
1:3	C1:3 _ 1	1666.90	0.82	8.22	8.35
	C1:3 _ 2	1880.47	0.93	9.28	
	C1:3 _ 3	1529.94	0.75	7.55	
1:4	C1:4 _ 1	886.33	0.44	4.37	4.78
	C1:4 _ 2	908.02	0.45	4.48	
	C1:4 _ 3	1110.23	0.55	5.48	
1:5	C1:5 _ 1	733.68	0.36	3.62	4.02
	C1:5 _ 2	882.04	0.44	4.35	
	C1:5 _ 3	831.61	0.41	4.10	

Imagen 15 Registro fotográfico, ensayo de cilindro de mortero sometido a tensión indirecta. Fuente (Elaboración propia).



### 3.4.4 Tensión indirecta en el pañete con fibras de acero

En la Tabla 15 se muestran los resultados de tensión indirecta del pañete, con mezcla 1:2 y fibras de acero. Se puede ver un aumento ligero en la resistencia a la tensión, aumento que se debe al agregar 1.3 kg de fibras de acero por cada 0.0379 m<sup>3</sup> de mortero, en la mezcla de pañete de cada muro.

Tabla 15 Resultado ensayo de cilindros con mezcla de pañete y fibras de acero, sometidos a tracción indirecta

Dosificación	Unidad	kgf	kgf/mm <sup>2</sup>	MPa	Promedio
1:2	C1:2 _ 1	2636.74	1.00	9.96	9.84
	C1:2 _ 2	1524.58	1.05	10.47	
	C1:2 _ 3	1851.53	0.91	9.08	

### 3.5 Compresión en muretes de mampostería.

Para determinar la curva esfuerzo de deformación de los prismas de mampostería, se calculó la deformación con base en las lecturas del comparador de carátula y el esfuerzo con base en la carga aplicada.

Por un lado, se determinó el esfuerzo en el muro, con la carga aplicada y el área transversal del murete según la Ecuación 1.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

$\sigma$  = *esfuerzo (MPa)*

$P$  = *Carga aplicada (kN)*

$A$  = *área del espécimen (m<sup>2</sup>)*

Con los datos de desplazamiento tomados de los comparadores de carátula y la longitud entre apoyos de cada comparador, se calculó la deformación del espécimen según la Ecuación 2.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_e} \quad \text{Ecuación 2}$$

$\varepsilon$  = *deformación (adimensional)*

$\delta$  = *acortamientos medidos (mm)*

$l_e$  = *longitud del ensayo (mm)*

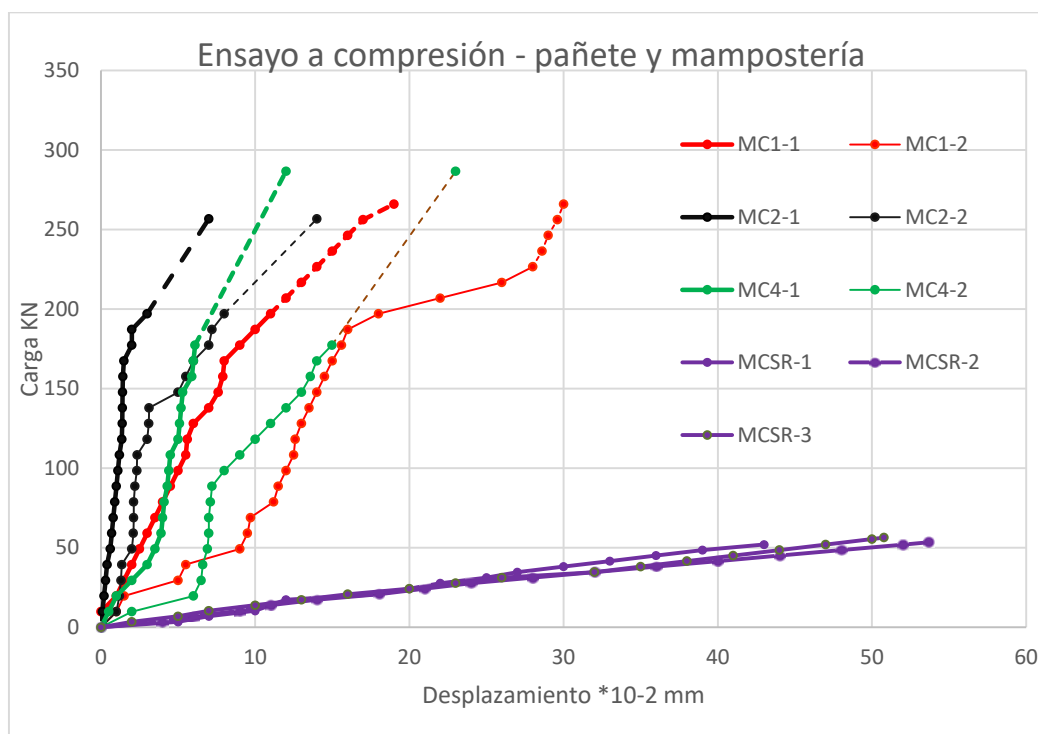
En el Gráfico 1, (En el anexo magnético se encuentran los datos registrados y cálculos), están los resultados de compresión en muretes; las líneas (MCSR-1, MCSR-2, MCSR-3) son los datos de muros de bloque #5 sin reforzamiento, elaborados con materiales con iguales características (unidades y morteros),

adaptados de (Sandoval, 2020), el resto de datos ( MC1-1, MC1-2, MC2-1 etc....) son los encontrados en este estudio.

Se observa que los muros sin reforzamiento tienen valores más bajos de resistencia y rigidez en comparación a los muros con reforzamiento. En los muros reforzados se ve una diferencia entre la línea que representa el comportamiento de la cara con malla (cara reforzada) y la cara sin malla, esta diferencia es debido a que el lado con malla es mucho más rígido que el lado sin malla, por este motivo y por compatibilidad de deformaciones se tiene que el elemento más rígido absorbe más carga.

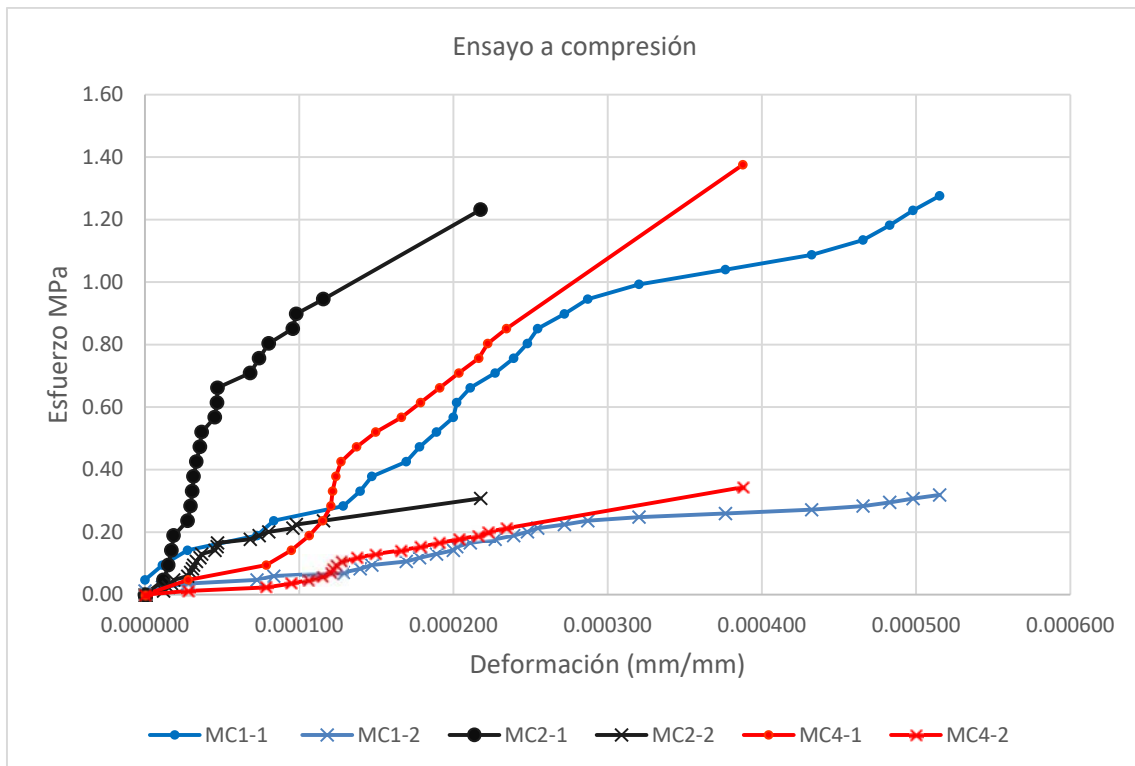
Las gráficas de los comparadores colocados en el lado sin malla presentan quiebres, debido a que los bloques #5 tiene un comportamiento frágil y durante el proceso de carga del muro, los bloques se van fisurando, generando estos saltos en las gráficas.

Gráfico 1 Gráfica carga desplazamiento



En el Gráfico 2, (En el anexo magnético se encuentran los datos registrados y cálculos), se muestra la relación esfuerzo deformación de los muretes reforzados. El esfuerzo se calculó con la carga que le corresponde a cada parte (mortero y mampostería simple) de acuerdo con su rigidez (Anexo A), y el área de cada una de las partes. Al determinar el módulo de rigidez del lado sin malla (MC1-2, MC2-2, MC4-2) y al determinar el módulo de rigidez del lado con malla (MC1-1, MC2-1, MC4-1), se tiene que el lado reforzado toma en todos los casos al menos el 80% del esfuerzo total del muro, el 20% restante es tomado por el muro de mampostería, la determinación del esfuerzo que le corresponde a la cara con malla y la cara sin malla, se hizo por medio de la compatibilidad de deformaciones. El cálculo del módulo de rigidez de los prismas de mampostería y el del mortero se pueden ver en el Anexo A.

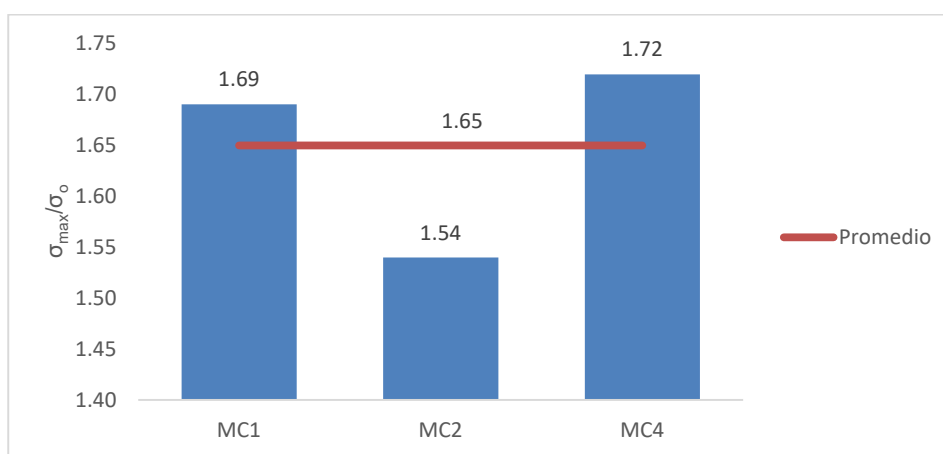
Gráfico 2 Gráfico esfuerzo – deformación.





Finalmente, el aumento en el esfuerzo máximo de los muros reforzados ( $\sigma_{\max}$ ) con los muros no reforzados ( $\sigma_o$ ) es en promedio 1.65 veces los muros sin refuerzo, véase Figura 3-1 lo cual es un aumento en su esfuerzo del 65%. Para esta comparación se calcula el esfuerzo del muro no reforzado como la carga última sobre el área de la mampostería simple y en el caso del muro no reforzado como la carga última sobre el área total (mampostería y mortero de refuerzo),

Figura 3-1 Esfuerzos máximo muros reforzados / esfuerzo muros sin refuerzo.



En cuanto al modo de falla, los muros reforzados presentan una fisuración gradual y lenta. En la cara con malla, véase (Imagen 16 e Imagen 17), el daño se presentó principalmente en las esquinas del murete, a medida que se aumentaba la carga en el muro, se desarrollaron más fisuras y las ya existentes se agrandaron. Sin embargo, la integridad del muro se mantuvo, la malla electrosoldada y las fibras de acero sirvieron para “coser” las fisuras.

Imagen 16 Ensayo a compresión 1. Fuente (Propia)



Imagen 17 Ensayo a compresión 2. Fuente (Propia)



Los anclajes de plástico expansivos mantuvieron, en la mayoría de los casos, la mitad de la unidad de mampostería (pared interna) unida al refuerzo de pañete véase Imagen 18.

Imagen 18 Ensayo a compresión 3. Fuente (Propia)



Por otro lado, en el lado sin malla, la fisuración en las unidades de arcilla empezó con valores bajos de carga y a medida que se aumentaba, se desarrollaban fisuras en las uniones internas del bloque véase Imagen 19; también se presentaban fisuraciones verticales y horizontales en el mortero de pega.

Imagen 19 Ensayo a compresión 4. Fuente (Propia)



También, se empieza un pandeo a todo lo largo de la cara sin refuerzo del muro, véase Imagen 20, y se presenta una fisuración en la unión de bloques con el pañete. Sin embargo, la falla no se da en esa división, sino por aplastamiento de los bloques de arcilla.

Imagen 20 Ensayo a compresión 5. Fuente (Propia)



### 3.6 Tracción diagonal en muretes.

Se realizó el cálculo del módulo de rigidez de los muretes mediante la metodología expuesta en la NTC - 4925. Las mediciones del cambio de longitud se tomaron en las diagonales de los muretes y se determinaron las deformaciones por cortante.

Se procesaron y graficaron los datos obtenidos en los ensayos de tracción diagonal y, por último, se realizaron los ajustes necesarios para determinar el desempeño de los muros reforzados frente a los no reforzados utilizando como guía para el procesamiento de datos los lineamientos dados en la ASTM E178-08.

Los esfuerzos de corte en el muro se calcularon con las ecuaciones dadas en la NTC 4925, tomando la carga y dividiéndola entre el área neta del murete tal como se muestra en la Ecuación 3

$$\tau = \frac{0.707 * P}{A_n} \quad \text{Ecuación 3}$$

$\tau$  = esfuerzo de corte (MPa)

$P$  = Carga aplicada (kN)

$A_n$  = área neta del murete (m<sup>2</sup>)

El área neta se calculó siguiendo la Ecuación 4.

$$A_n = \frac{l + a}{2} * (e * n) \quad \text{Ecuación 4}$$

$A_n$  = área neta del murete (mm<sup>2</sup>)

$l$  = longitud del espécimen (mm)

$a$  = altura del espécimen (mm)

$e$  = espesor del total del espécimen (mm)

$n$  = porcentaje del área bruta

La distorsión o deformación por corte se calculó siguiendo la Ecuación 5.

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad \text{Ecuación 5}$$

$\gamma$  = deformación por corte (mm)

$\Delta V$  = acortamiento vertical (mm)

$\Delta H$  = acortamiento horizontal (mm)

$g$  = longitud en la cual se hace la medición (mm)

En el Gráfico 3, (Véase el detalle de los cálculos en anexo magnético), puede verse que los muretes no reforzados (MTDSR-1, MTDSR-2, MTDSR-3, poseen un

comportamiento uniforme en cuanto a resistencia, rigidez y ductilidad, la cual es baja, indicando una falla frágil.

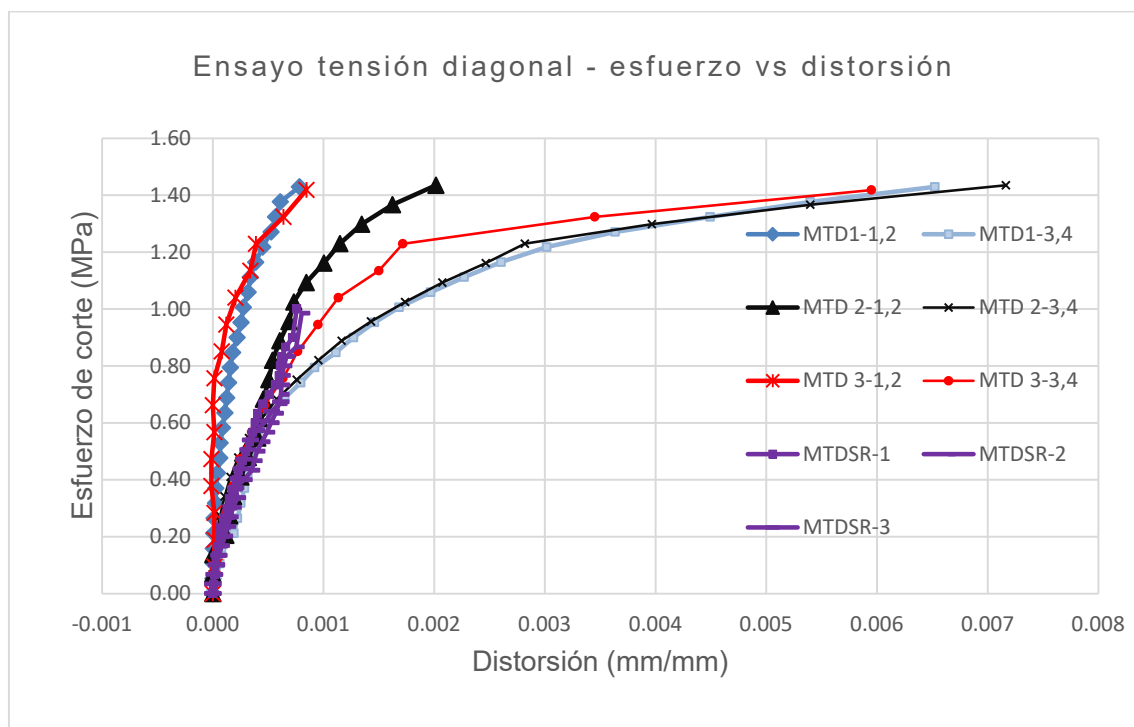
Comparando el comportamiento de los muros sin reforzamiento con los muros reforzados (MTD1-1, MTD1-2, MTD2-1, MTD2-2, MTD3-1, MTD3-2), son evidentes las diferencias mecánicas, en cuanto a resistencia, rigidez y ductilidad. Esta comparación es posible porque los muretes de esta investigación y los muretes no reforzados de Sandoval tienen las mismas dimensiones y fueron elaborados con materiales de iguales características.

Los muretes reforzados se comportan elásticamente ante regímenes bajos de carga. Tienen una rigidez ligeramente mayor en la cara con malla y similar en la cara sin malla, a la de los muros sin reforzamiento. Por otro lado, a diferencia de los muros no reforzados los muros reforzados tienen un comportamiento no lineal al aumentar la carga.

El esfuerzo de corte máximo en los muros reforzados por una cara es alrededor de un 40% mayor a los no reforzados. La distorsión que alcanza la pared externa de la cara sin malla es mucho mayor antes de la falla, mostrando una mejora en la ductilidad. Y, cuando se alcanza la carga máxima, la cara con malla, solo presenta fallas locales en los puntos de aplicación de la carga.

Por lo dicho anteriormente, los muros reforzados con la metodología propuesta presentan un comportamiento mejor que los muros sin reforzamiento, ya que permiten desarrollar mayores valores de resistencia y deformación. Llama la atención que la distorsión de la cara sin malla es mayor que la cara con malla, lo que indica que la pared externa de las unidades sufre mayor distorsión; esto ocurre por la formación de fisuras en esta pared.

Gráfico 3 Esfuerzo de corte vs Distorsión.



En el Gráfico 4, (Véase el detalle de los cálculos en anexo magnético), se muestra la relación entre la resistencia de los muros reforzados ( $\tau_{max}$ ), respecto a los muros sin reforzamiento ( $\tau_0$ ). Se puede ver que, en todos los reforzamientos, la resistencia de los muretes reforzados es por lo menos de 1.4 veces la resistencia promedio de los no reforzados, es decir se presenta un aumento en el 40% de la resistencia al corte véase Figura 3-2. Además, debido al reforzamiento, los muretes pueden sostener el valor de carga máximo por un periodo de deformaciones (distorsiones) más amplio.

Gráfico 4 Ensayo de tensión diagonal, proporción muros. Fuente (Propia).

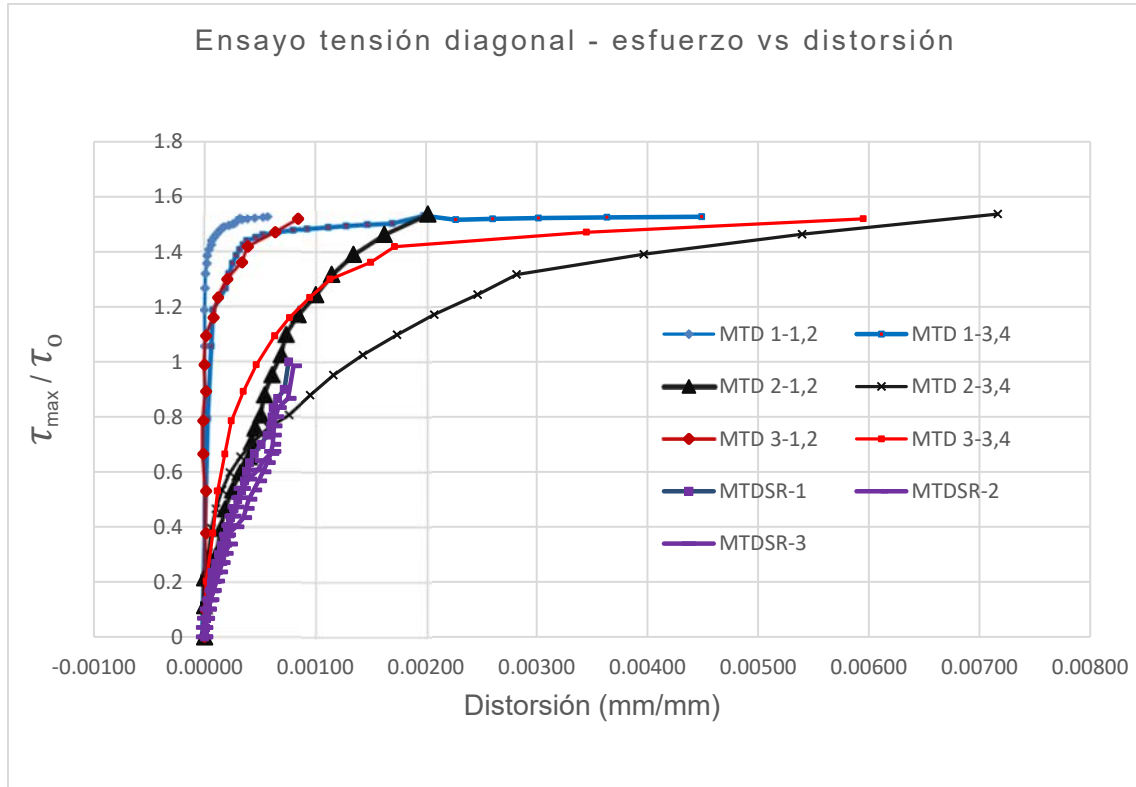
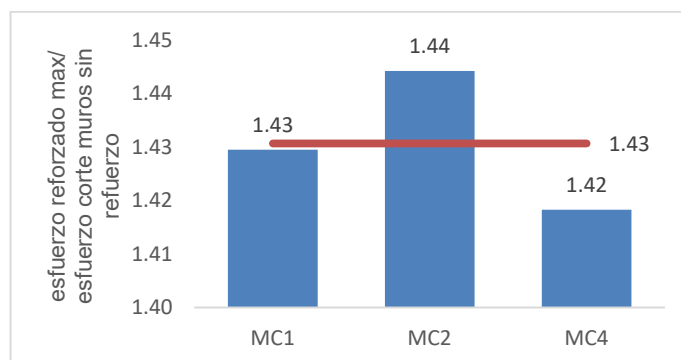


Figura 3-2 Esfuerzos corte máximo muros reforzados / esfuerzo corte muros sin reforzar.



En cuanto al modo de falla de los muros, se tiene que en los muros sin ningún tipo de reforzamiento las fallas que se presentan son fallas por corte, producto de un deslizamiento del mortero de pega y fallas locales en los puntos de aplicación de carga.



El reforzamiento realizado en los muretes, mejoró sustancialmente el comportamiento, ya que aun cuando en la cara sin reforzamiento, se presentaba un deslizamiento en el mortero de pega véase (Imagen 21) , el lado con pañete, permitió mantener la integridad del muro y un desarrollo de fisuras más prolongado, sin que se presentara una falla súbita del muro. A medida que la carga aumentaba las fisuras iniciales se hicieron más grandes, véase (Imagen 22), hasta que se presentaba un daño generalizado en el murete; también se vio que la falla se producía fuera del plano, es decir el muro de bloque #5 tiende a pandearse fuera del plano véase Imagen 22.

Imagen 21 Ensayo tensión diagonal 1.  
Fuente (Propia)



Imagen 22 Ensayo tensión diagonal 2.  
Fuente (Propia)



Adicionalmente, se dio un aplastamiento en los puntos de aplicación de carga, véase Imagen 24, y se generó una separación entre el pañete y el muro, véase Imagen 23, (para el ensayo se siguieron las indicaciones de la NTC 4925:2001, sobre la colocación de soportes de carga). Los muros reforzados fueron capaces de redistribuir el daño, véase Imagen 25 e Imagen 26, y traducirlo en una fisuración en el pañete y en el mortero de pega, manteniendo la integridad del muro.

Imagen 23 Ensayo tensión diagonal 3.  
Fuente (Propia)



Imagen 24 Ensayo tensión diagonal 4.  
Fuente (Propia)



En la Imagen 25 e Imagen 26, se observa el estado final en los puntos de aplicación de carga donde es evidente que, gracias al reforzamiento, no hubo un colapso súbito del muro.

Imagen 25 Ensayo tensión diagonal 5.  
Fuente (Propia)



Imagen 26 Ensayo tensión diagonal 6.  
Fuente (Propia)



## **4. Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1 Conclusiones**

#### **4.1.1 Ensayo de compresión muros de mampostería**

Se obtiene una mayor resistencia y rigidez a compresión inconfiada, en los muretes elaborados con unidades de arcilla de perforación horizontal reforzados, con malla por una cara, con respecto a los muretes elaborados con unidades de arcilla de perforación horizontal no reforzados.

La carga última alcanzada de los muretes reforzados se encuentra entre 4.5 y 5.0 veces la carga última de los muretes no reforzados. Considerando que al realizar el reforzamiento se aumenta el área del murete por la capa del pañete en el cual está embebida la malla electrosoldada, en términos de esfuerzo se logró un aumento de 1.65 veces.

Adicionalmente, se vio un aumento de la rigidez de los muretes reforzados en la cara con malla en comparación a los no reforzados.

A diferencia de los muretes no reforzados no se presentó una falla súbita y explosiva. Los muretes reforzados, en la cara con malla, presentaron una fisuración gradual en las esquinas; a medida que se aumentaba la carga se desarrollaron más fisuras y las ya existentes se agrandaron. La integridad de la cara con malla se mantuvo hasta el final del ensayo. La pared interna de la mampostería sin malla se mantuvo unida al lado reforzado gracias a los chazos de plástico. Se observó un pandeo a todo lo largo de la cara sin malla y fisuras en la unión de bloques con el pañete hasta que, al aumentar la carga, la mampostería se desmoronaba. A pesar de esto, el murete seguía resistiendo carga dado que la cara con malla se siguió manteniendo en pie.

### **4.1.2 Ensayo de tensión diagonal**

Para el caso de los ensayos de tensión diagonal, la resistencia y las deformaciones en los muretes reforzados por una cara, fueron mayores con respecto a los muretes sin reforzamiento. El esfuerzo máximo de corte se vio incrementado en por lo menos 1.43 veces.

En cuanto a la deformación, se dota al murete con una mayor capacidad de deformación evitando el colapso súbito. La distorsión que alcanza el lado sin malla en la pared externa de los bloques es mucho mayor que la distorsión alcanzada por los muretes no reforzados. En el momento de la falla, la cara con malla no ha alcanzado su máxima distorsión dado que mantiene su integridad y sigue manteniendo carga.

En el ensayo de tensión diagonal en la cara sin malla, se presentaban deslizamientos en el mortero de pega, pero el lado con malla permitió mantener la integridad del muro y un desarrollo de fisuras más prolongado. A medida que la carga aumentaba, las fisuras iniciales se hicieron más grandes derivando en un daño generalizado en el murete, También se vio que la falla tendía a producirse fuera del plano, es decir que a medida que la fisura se agrandaba, la pared se pandeaba fuera del plano. A pesar de que se llegó a un punto donde no se observaba aumento de carga con un mayor desplazamiento del punto de la carga el murete seguía resistiendo carga, por esta razón se suspendió el ensayo y adicionalmente porque los puntos de aplicación de carga se aplastaron.

El reforzamiento propuesto es relativamente económico, y no requiere mano de obra cualificada, dicho costo puede disminuirse variando la separación de los grafiles de la malla, el espesor y dosificación del mortero de recubrimiento. Inicialmente se propuso un pañete de 50 mm de espesor con resistencia entre 2600 y 3000 psi; en un estudio posterior se podrían variar estos espesores y usar resistencias menores, Además, la malla electrosoldada usada para este estudio fue de 4.5 mm con separación de alambres de 15 cm X 15 cm y separada 35 mm del

borde del muro, esta separación se podría variar junto con el espesor del pañete y el tipo de malla usada.

Finalmente es factible realizar un reforzamiento con esta metodología dado que se mejora sustancialmente la resistencia y la rigidez de los muros y se permite alcanzar valores mayores de deformación sin que se presente una falla súbita permitiendo que en caso de que haya un evento sísmico se prevenga la falla de una vivienda, aumentando el nivel de seguridad, o, que si esta se presenta, no sea de forma súbita permitiendo el desalojo de la vivienda antes de que colapse.

## **4.2 Recomendaciones**

Se encontraron ciertas dificultades a la hora de realizar varias de las actividades del presente trabajo, por lo tanto, hay ciertos aspectos del montaje, fabricación y ensayo que vale la pena destacar, en primer lugar, se recomienda el uso de cilindros de acero de 2" por 4" para la fabricación de probetas para pañete, sin embargo, al no contar con estos en el laboratorio se utilizaron cilindros elaborados con tubería de PVC. Se recomienda en lo posible usar moldes cilíndricos de acero debidamente fabricados para este fin.

También al momento de realizar los ensayos, no se pueden tener datos una vez empezada la fisuración del muro, ya que la falla de estos muretes puede dañar los equipos de medición y debido a que no se cuenta con un dispositivo especializado, por lo tanto, hay un vacío de deformaciones no medidas en los especímenes, desde el momento que se empieza la fisuración hasta el momento de falla o colapso del muro, solamente se tiene el valor de carga al final, los valores faltantes se interpolan.

Otro aspecto para resaltar es que, al momento de aplicar la carga de los muretes, ya sea a compresión confinada o tensión diagonal es difícil lograr ajustar el centro de rigidez del murete con el punto de aplicación de la carga. El desplazamiento del murete y su colocación dentro del montaje de carga debe realizarse con tres o

cuatro personas y grandes dificultades, por tal motivo se recomienda el uso de algún método más adecuado.

La manera como se aplica la carga en los muretes en los diferentes ensayos presenta otros inconvenientes, en primer lugar, en los ensayos de tensión diagonal, al colocar las abrazaderas en las esquinas del murete, se induce una falla local en las esquinas del murete, sin embargo, se utilizaron los soportes de carga estipulados por la norma NTC, por lo cual sería recomendable elevar ante la entidad que las regulariza los inconvenientes que se presentan.

## A. Anexo A.

Ensayo a compresión en unidades de arcilla de perforación horizontal (bloque #5).

Nombre	Espesor	Anchura	Altura	FUERZA MAXIMA	Max esfuerzo	
				Calculo Area en su totalidad	Calculo Area en su totalidad	
Unidad	mm	mm	mm	kgf	kgf/mm2	MPa
LADR_1	300	100	200	7840.565	0.26135	2.56
LADR_2	300	100	200	19250.53	0.64168	6.29
LADR_3	300	100	200	8360.25	0.27868	2.73
LADR_4	300	100	200	8650.56	0.28835	2.83
LADR_5	300	100	200	8540.35	0.28468	2.79

Promedio sin retirar el valor de LADR_2	Promedio retirando el valor de LADR_2
3.44	2.73

Ensayo a tensión mallas electrosoldadas

No mb re	Dia me tro	Longit ud calibra da	Elastic	FUERZA DE FLUENCI A	FUERZA MAXIMA	Max_Esfuerzo	FUERZA DE ROTUR A
			Force 30000 - 50000 N	0.20%	Calculo Area en su totalidad	Calculo Area en su totalidad	Sensibil idad 10
Uni da d	m m	mm	N/mm2	N	N	N/mm2	N
M ALL A 1	4.0 1	100	--	--	8592.18	680.338	7064.3 9

M ALL A 2	3.9 2	100	--	--	9165.29	759.424	6466.8 7
M ALL A 3	4.0 8	100	--	--	9499.36	726.581	7481.5 3
M ALL A 4	3.9 8	100	--	--	8801.7	707.474	7197.0 9

### Ensayo de morteros de pega

Dosificación 1:3						
Cubos	Espesor	Anchura	Altura	Fuerza máxima		
	m	m	m	kN	Mpa	
Cubo 1	0.05	0.05	0.05	27.5	11.0	
Cubo 2	0.05	0.05	0.05	23.0	9.2	
Cubo 3	0.05	0.05	0.05	31.4	12.6	
Promedio					10.9	

CAO_1			CAO_2			CAO_3		
Tiempo	Force	Stroke	Tiempo	Force	Stroke	Tiempo	Force	Stroke
seg	kgf	mm	seg	kgf	mm	seg	kgf	mm
0	7,399,09 2	0	0	1,024,74 8	0	0	2,536,70 7	0
1	2,310,26 5	0,157072 9	1	2,630,55 1	0,157062 5	1	103,175	0,157062 5
2	4,775,68 9	0,323729 2	2	4,496,00 5	0,323739 6	2	2,645,47 8	0,323708 3



3	8,995,36 5	0,490395 8	3	6,682,86 3	0,490406 2	3	5,226,38 4	0,490385 4
4	1485,58	0,657062 5	4	9,255,40 5	0,657062 5	4	9,137,73 6	0,657052 1
5	2,061,23 3	0,823718 7	5	1,232,53 7	0,823729 2	5	1,490,22 9	0,823697 9
6	2,463,49 9	0,990385 4	6	1,505,55 5	0,990416 6	6	2,213,34 8	0,990395 8
7	2,697,96 3	1,157,07 3	7	1,686,49 9	1,157,05 2	7	2,966,13 8	1,157,05 2
8	2,806,16 1	1,323,71 9	8	1,908,87 5	132,374	8	3,202,53 7	1,323,70 8
9	2367,15	1,490,39 6	9	2,136,16 8	1,490,39 6	9	3,069,96 9	1,490,38 5
10	1,929,44 8	1,657,07 3	10	2,301,06 1	1,657,07 3	10	2562,73	1,657,06 3
10,35	1827,97	1,701,17 7	11	2,341,91 5	1,823,72 9	11	1,942,24 6	1,823,70 8
			12	1,477,95 1	1,990,40 6	12	1,729,09 4	1,990,39 6
			13	1,240,22 9	2,157,05 2	12,9	1579,4	2,126,16 7
			14	1,063,48 2	232,374			
			15	9,857,95 2	2,490,39 6			
			16	929,834	2,657,06 3			

			17	8,832,62 1	282,374			
			17,45	8,655,04 6	2,884,52 1			

### Ensayo de compresión de pañete sin fibras de acero

Dosificación	Unidad	m m	m m	m m	Calculo Area en su totalidad		Pro medi o
					kgf	kgf/mm2 Mpa	
1:2	C1: 2_1	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	3980.60	1.59 15.92	18.9 6
	C1: 2_2	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	5512.79	2.21 22.05	
	C1: 2_3	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	4723.15	1.89 18.89	
1:3	C1: 3_1	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	4316.98	1.73 17.27	16.6 6
	C1: 3_2	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	4910.83	1.96 19.64	
	C1: 3_3	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	3263.81	1.31 13.06	
1:4	C1: 4_1	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	2117.83	0.85 8.47	8.31
	C1: 4_2	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	2216.34	0.89 8.87	
	C1: 4_3	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	1898.84	0.76 7.60	
1:5	C1: 5_1	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	1888.84	0.76 7.56	6.01

C1: 5_2	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	1797.91	0.72	7.19
C1: 5_3	50 .0 0	50 .0 0	50 .0 0	819.17	0.33	3.28

Ensayo de tensión indirecta de los cilindros de mortero sin fibras de acero.

	Nombre	FUERZA MAXIMA	Max._Esfuerzo		
	Parámetro	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas		
Dosificación	Unidad	kgf	kgf/mm2	Mpa	Promedio
1:2	C1:2_1	2436.74	0.92	9.20	8.82
	C1:2_2	1324.58	0.91	9.10	
	C1:2_3	1651.53	0.81	8.15	
1:3	C1:3_1	1666.90	0.82	8.22	8.35
	C1:3_2	1880.47	0.93	9.28	
	C1:3_3	1529.94	0.75	7.55	
1:4	C1:4_1	886.33	0.44	4.37	4.78
	C1:4_2	908.02	0.45	4.48	
	C1:4_3	1110.23	0.55	5.48	
1:5	C1:5_1	733.68	0.36	3.62	4.02
	C1:5_2	882.04	0.44	4.35	
	C1:5_3	831.61	0.41	4.10	

Muestra de cálculos; ensayo de compresión de muretes, el detalle de los cálculos se encuentra en la memoria magnética de este documento.

Murete MC-1	
Deformation promedio	Esfuerzo
0.000000	0
0.000011	0.04727531
0.000028	0.09455062
0.000073	0.14182592
0.000084	0.18910123
0.000129	0.23637654
0.000140	0.28365185

0.000147	0.33092716
0.000169	0.37820246
0.000178	0.42547777
0.000189	0.47275308
0.000200	0.52002839
0.000202	0.5673037
0.000211	0.614579
0.000227	0.66185431
0.000239	0.70912962
0.000248	0.75640493
0.000255	0.80368023
0.000272	0.85095554
0.000287	0.89823085
0.000320	0.94550616
0.000376	0.99278147
0.000432	1.04005677
0.000466	1.08733208
0.000483	1.13460739
0.000498	1.1818827
0.000515	1.22915801
0.000541	1.27643331

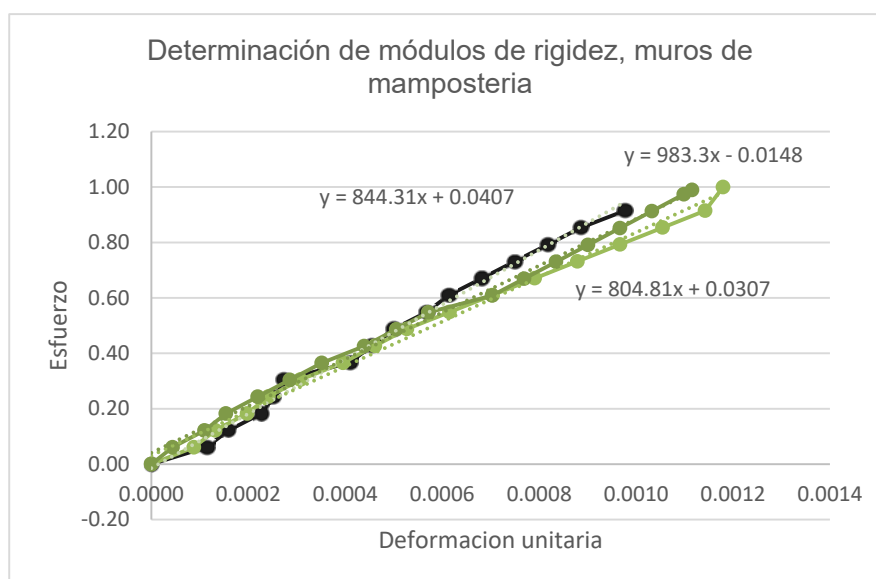
Muestra de cálculos; ensayo de tensión diagonal en muretes, el detalle de los cálculos se encuentra en la memoria magnética de este documento.

ETD1			
1		2	
$\tau$	$\gamma$	$\tau$	$\gamma$
0	0.00000	0	0.0000
0.00	0.00000	0	0.0000
0.79129053	0.00000	0.79129053	0.0000
1.05505404	0.00001	1.05505404	0.0001
1.1869358	0.00000	1.1869358	0.0001
1.26606485	0.00001	1.26606485	0.0002
1.31881755	0.00001	1.31881755	0.0002
1.35649806	0.00002	1.35649806	0.0003
1.38475843	0.00003	1.38475843	0.0003

1.40673872	0.00004	1.40673872	0.0003
1.42432296	0.00006	1.42432296	0.0003
1.43871006	0.00007	1.43871006	0.0004
1.45069931	0.00009	1.45069931	0.0005
1.46084406	0.00011	1.46084406	0.0005
1.46953956	0.00013	1.46953956	0.0007
1.47707566	0.00014	1.47707566	0.0008
1.48366975	0.00016	1.48366975	0.0009
1.48948806	0.00018	1.48948806	0.0011
1.4946599	0.00022	1.4946599	0.0013
1.49928733	0.00026	1.49928733	0.0015
1.50345201	0.00028	1.50345201	0.0017
1.52171461	0.00032	1.53171461	0.0020
1.51630899	0.00034	1.51630899	0.0023
1.51944835	0.00039	1.51944835	0.0026
1.52232609	0.00045	1.52232609	0.0030
1.52497362	0.00053	1.52497362	0.0036
1.52741748	0.00057	1.52741748	0.0045
1.52968032	0.00061	1.52968032	0.0054
1.53178153	0.00078	1.53178153	0.0065

En la Figura 4-1 se puede ver el cálculo del módulo de rigidez de los prismas de mampostería.

Figura 4-1 Modulo de rigidez muros de mampostería



## Bibliografía

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2001). Manual de construcción, evaluación y rehabilitación sísmo resistente de viviendas de mampostería.
- Bartolom, A. S., Mor, A. C., & Per, L. D. E. L. (2002). REPARACIÓN DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA, 1–8.
- Bhattacharya, S., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2014). A critical review of retrofitting methods for unreinforced masonry structures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 7, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2013.12.004>
- Caori Patricia Takeuchi. (2010). *Comportamiento en la mampostería estructural*.
- Chuang, S., Zhuge, Y., & Mcbean, P. C. (2004). 13 th World Conference on Earthquake Engineering SEISMIC RETROFITTING OF UNREINFORCED MASONRY WALLS BY CABLE SYSTEM, (3228).
- Dávila, D. T. (2011). REFUERZO DE MUROS Y TABIQUES DE ALBAÑILERÍA CON MALLAS DE POLÍMERO.
- Díaz, B. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta i moderada. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93542>
- Hamburger, R. O. (2006). Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, ANSI/AISC 358-05. *Structures Congress 2006@ SStructural Engineering and Public Safety*, (1), 1–8. [https://doi.org/10.1061/40889\(201\)5](https://doi.org/10.1061/40889(201)5)
- Jesús Humberto Arango. (2001). Edificios altos de mampostería en arcilla. *Jesús Humberto Arango*, 105.
- Milton Mena Serna, et al. (2019). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CRITERIOS DE SUPERVISIÓN DE EDIFICACIONES EN MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL SEGÚN LA NSR-10* (Editorial). Bogotá.
- NSR-10. (2010). NSR-10.
- Oscar Javier Ortiz, S. (2020). Determinación de las características mecánicas de muretes de mampostería simple reforzados con malla de acero y conectores transversales sometidos a carga axial y tensión diagonal.

- 
- Santa-maria, H., Duarte, G., & Garib, A. (2004). 13 th World Conference on Earthquake Engineering EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MASONRY PANELS EXTERNALLY STRENGTHENED WITH CFRP LAMINATES AND FABRIC SUBJECTED TO IN-PLANE SHEAR LOAD, (1627).
- Shrestha, H., Pradhan, S., & Guragain, R. (2012). Experiences on Retrofitting of Low Strength Masonry Buildings by Different Retrofitting Techniques in Nepal. *15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon Portugal*, (January 2006).
- Suaréz, M. del R. P. (2004). Modalidades de refuerzo para mampostería con aceros con esfuerzo de fluencia de 6000 kg/cm<sup>2</sup>. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, (315), 1–10.
- Torres, J. (2009). COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CON ELEMENTOS DE BORDE CONFINADOS CON PLATINAS EN EL MORTERO DE PEGA, 64. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2008.04.008>
- Tumialan, J. G., Bartolome, A. S., & Gumpertz, S. (2007). Comportamiento sísmico de tabiques reforzados con varillas de fibra de vidrio.
- Viviana, I. N. G., & Rougier, C. (2007). REFUERZO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CON MATERIALES COMPUESTOS.