

ALTERNATIVA ESTRUCTURAL DE REFUERZO HORIZONTAL EN MUROS DE MAMPOSTERÍA

Diego Fernando Páez Moreno¹
Sonia Ximena Parra Rojas²
Carlos Andrés Montaña Gutiérrez³

Recibido: 02/03/2007

Aceptado: 07/05/2009

RESUMEN

La implementación de refuerzo horizontal en muros de mampostería con ladrillo macizo de arcilla cocida es una técnica empleada en varios países. En este trabajo se propone un análisis para muros de mampostería representativos de la ciudad de Tunja con la implementación de grafiles de acero como alternativa de refuerzo horizontal. Este estudio involucra la definición de los tipos de materiales a emplear, las características de los muros a ensayar y las variables que se deben aplicar, tanto en los muros como en la ejecución del ensayo de compresión diagonal, que define tipos de muros con características propias de refuerzo. Los resultados del proceso de análisis del comportamiento individual y general de los muros de mampostería sometidos al ensayo de compresión diagonal permiten identificar la variación del esfuerzo cortante representativo para cada tipo de muro, en relación con el refuerzo empleado en los diferentes modelos y la tipología de falla.

Palabras clave: mampostería, ensayo de compresión diagonal, refuerzo horizontal, grafiles, esfuerzo cortante.

-
- 1 Ingeniero Civil, Universidad Nacional (sede Bogotá). Magíster Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Profesor asistente -Ingeniería en Transporte y Vías - Facultad de Ingeniería - UPTC Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Tunja. Grupo de Investigación GRINFRAVIAL. Dirección Electrónica: ing_dpaez@yahoo.com
 - 2 Ingeniera Civil Facultad de Ingeniería - UPTC Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Tunja. Grupo de Investigación GRINFRAVIAL
 - 3 Ingeniero Civil Facultad de Ingeniería - UPTC Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Tunja. Grupo de Investigación GRINFRAVIAL

STRUCTURAL ALTERNATIVE OF HORIZONTAL REINFORCEMENT IN MASONRY WALLS

ABSTRACT

Implementation of horizontal reinforcement in masonry walls with solid cooked clay bricks is a commonly used technique in several countries. This article is intended to analyze masonry walls representatives of Tunja City, with implementation of small steel bars as an alternative of horizontal reinforcement. This study involves definition of types of materials to be used, characteristics of walls to be tested, and variables which should be applied in both walls and during the execution of the diagonal compression test which defines the types of walls with own characteristics of reinforcement. Results from individual and general behavior analysis process of masonry walls subject to diagonal compression tests allow identifying variation of shear stress for each kind of wall, in relation to reinforcement used in several models and failure typology.

Key words: masonry; diagonal compression test, horizontal reinforcement, small steel bars, shear stress.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de esta investigación se basa en emplear un elemento nuevo en el sistema, como el acero grafilado, a modo de refuerzo horizontal interior en muros de mampostería de ladrillos macizos de arcilla cocida. Se plantea, en el desarrollo del proyecto, la comparación del comportamiento de muros sin refuerzo frente a cuatro posibilidades de muros con refuerzo horizontal, a través de los resultados de someter al ensayo de compresión diagonal a 25 muros agrupados en 5 opciones, cada una compuesta, a su vez, por 5 muros de iguales características. Las 5 opciones propuestas están planteadas a partir de la cantidad y ubicación del refuerzo (grafiles) dentro del muro; así, la primera opción es la de los muros de referencia, aquellos que no presentan refuerzo en su interior, mientras que las cuatro opciones restantes presentan en sus muros el refuerzo en diferente ubicación y cantidad.

El uso de grafiles dentro del muro como opción de refuerzo y el análisis del sistema de mampostería con la implementación de éste se hace importante a fin de identificar el efecto que puede tener el nuevo elemento en el interior del muro, especialmente frente al comportamiento de muros sin refuerzo.

Durante la realización de los ensayos de compresión diagonal, se ha podido constatar la importancia en términos de resistencia del aporte del refuerzo horizontal colocado en el muro, referido a la tipología de falla, a la trayectoria de la misma en relación con la distribución del refuerzo y al esfuerzo cortante resistido para cada tipo de muro.

I. DEFINICIONES INICIALES

Los muros de mampostería de piezas artificiales están formados básicamente por dos elementos: por un lado, piezas que forman los ladrillos o bloques de arcilla cocida, y por otro, el mortero que se utiliza para unir dichas piezas; estos com-

ponentes se unen con el fin de actuar como un solo elemento. Existe, además, en la mampostería el refuerzo como elemento adicional, empleado desde hace algún tiempo en distintas modalidades de mampostería reforzada, donde se agrega acero de refuerzo en la dirección vertical mediante el uso de piezas huecas, y en la dirección horizontal en las juntas de mortero y/o empleando piezas especiales, cuya finalidad es también mejorar notablemente la capacidad de resistir cargas verticales y laterales, al aumentar en este último caso tanto su resistencia como su capacidad de deformación lateral.

El comportamiento de un muro frente a las cargas impuestas está determinado por las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que se emplean en su construcción y la capacidad de estos para resistir las fuerzas internas generadas; de modo tal que para conocer algunas de las propiedades más representativas de los materiales empleados en la elaboración de los muros, a estos se les practicaron ensayos como resistencia nominal a la compresión de unidades de mampostería (f'_{cu}), absorción de agua, granulometría, resistencia a la compresión del mortero (f'_{cp}).

I.1 FALLA EN MUROS DE MAMPOSTERÍA

Cuando los muros de mampostería no cuentan con un adecuado confinamiento, una cantidad suficiente o detallado adecuado del refuerzo en los elementos confinantes, o no presentan ningún tipo de refuerzo, se han detectado cuatro tipos de patrones de agrietamiento, que dan origen a fallas en los muros (Miranda, 2002; Gallegos, 2002):

I.1.1 Falla de corte por deslizamiento

El agrietamiento por deslizamiento se presenta a lo largo de la junta horizontal de mortero como consecuencia de una falla de adherencia por corte en la junta, ocasionada por la poca adhesión entre las unidades y el mortero.

1.1.2 Falla de corte

El agrietamiento por corte se puede presentar en forma de escalera siguiendo la junta de mortero, caracterizada por su forma diagonal a lo largo del muro y es consecuencia de las tensiones de tracción diagonal o esfuerzos de corte que se producen en el mismo.

1.1.3 Falla de flexión

El agrietamiento se presenta en forma vertical en las esquinas y el centro, que puede presentarse en muros esbeltos, y produce una falla de compresión por flexión en el talón comprimido del muro.

1.1.4 Falla de aplastamiento por compresión diagonal

Esta falla es producto del efecto de puntal que se produce cuando se separa el cuerpo del muro de los elementos de confinamiento, situación que genera grandes tensiones de compresión en las esquinas del muro, las que pueden provocar la falla por aplastamiento de la zona cuando la mampostería es de baja calidad o cuando se usan unidades del tipo rejilla de paredes delgadas.

En el caso de muros de mampostería reforzada, además de los modos de falla que aquí se presentan, se puede presentar una falla de compresión cuando la cuantía del acero es elevada. Los modos de falla más comunes de la mampostería se muestran en la figura 1.

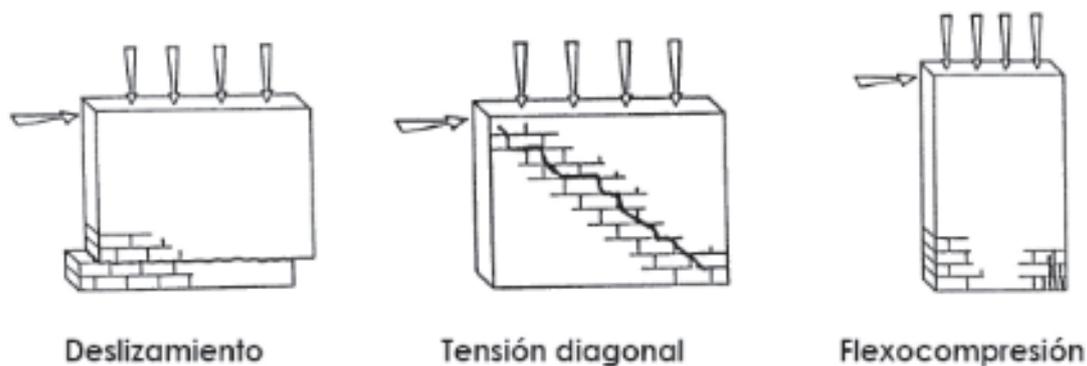


Figura 1. Posibles modos de falla en un muro de mampostería

Fuente: elaboración propia.

2. INVESTIGACIONES DESARROLLADAS

En su variedad de tipos, la mampostería se ha utilizado en la construcción de múltiples estructuras, especialmente aquellas dedicadas a la habitación; antiguamente eran habituales los muros empleados únicamente para resistir cargas verticales, y se ignoraban las cargas sísmicas; reconociendo esta condición, se empezaron a efectuar ideas a partir de investigaciones en torno a este tema a fin de implementar cambios en el método, de modo que

los muros resistieran, simultáneamente a las cargas verticales, las cargas horizontales generadas.

En relación con investigaciones desarrolladas sobre estructuras de mampostería, en especial confinada y reforzada interiormente, se destacan los estudios que se han adelantado hasta el momento en Colombia y en otros países como Chile, México, Perú y Eslovenia. En Estados Unidos como en Nueva Zelanda y Japón también se han desarrollado variadas investigaciones, sin embargo, estas centran su atención en la mampostería a base de piezas

industrializadas de concreto, y reforzada mediante columnas interiores. Una síntesis de trabajos desarrollados en algunos de los países nombrados se presenta a continuación, y se destacan el objetivo y las principales conclusiones y recomendaciones hechas por los autores. Ciertos términos empleados en este numeral corresponden a expresiones utilizadas en el país de origen de la investigación.

2.1 INVESTIGACIÓN EN EL EXTERIOR

- Lüders e Hidalgo (1986), en el Laboratorio de Ingeniería Estructural de la Pontificia Universidad Católica de Chile, realizaron ensayos de cortante cíclico alternado 17 muros a escala natural, con distintas cuantías de refuerzo horizontal. Fueron estudiadas la influencia del tipo (barras y escalerilla), cuantía de refuerzo en el primer agrietamiento y en la resistencia última de los muros, así como la relación del refuerzo horizontal con los modos de falla y con la capacidad de deformación. Las principales conclusiones de Lüders e Hidalgo fueron: a) El inicio del agrietamiento por corte en muros de mampostería reforzada no depende del refuerzo horizontal; se inicia cuando la resistencia a tensión diagonal del muro se alcanza. Los valores de la resistencia a tensión diagonal encontrados durante los ensayos oscilan entre 0,25 y $\sqrt{0,45}$ f'm. b) El refuerzo horizontal mínimo hace crecer en forma importante la capacidad de deformación sin pérdida de resistencia al corte. c) La eficiencia del refuerzo depende del tipo de refuerzo.
- La investigación experimental desarrollada por Díez (1987) tenía como objeto estudiar el comportamiento de muros de mampostería de unidades cerámicas ante carga lateral alternada. Las variables del estudio fueron el tipo de refuerzo y la relación de aspecto de los muros. Entre las modalidades de refuerzo se emplearon: armado vertical en los huecos de

las piezas, refuerzo horizontal en las juntas de mortero y elementos de concreto reforzado que confinan al muro de mampostería simple. Las conclusiones que Díez y sus colaboradores presentaron son las siguientes:

- a) La falla por corte en muros sin refuerzo horizontal es muy frágil y se ve dominada por una grieta diagonal principal que va de esquina a esquina.
 - b) El refuerzo mediante escalerillas en las juntas de mortero controló el agrietamiento distribuyendo el daño y haciendo más gradual la falla.
 - c) La colocación de refuerzo horizontal aumenta la capacidad resistente a corte de los muros. La efectividad del refuerzo mediante escalerilla fue buena, siempre que no se alcancen deformaciones de fluencia.
 - d) Desde el punto de vista de comportamiento sísmico, el mejor sistema de refuerzo para la mampostería es el confinamiento mediante elementos de concreto reforzado y escalerillas en las juntas de mortero para controlar el agrietamiento y el deterioro de las piezas.
- El trabajo de Astroza y Schmidt (2004) se basó en establecer los niveles de deformación de los muros de albañilería confinada para los estados límite que interesan en su diseño.

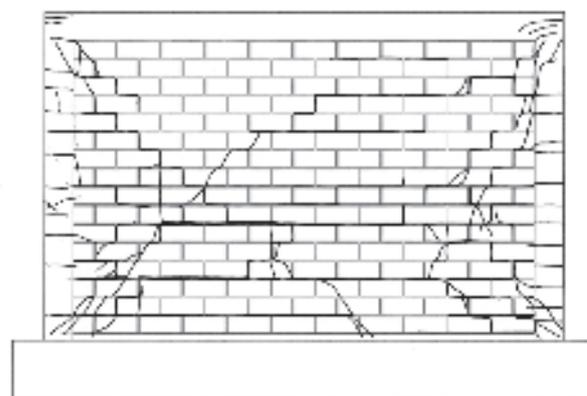


Figura 2. Estado de daño de un muro de estado límite ELDC.

Fuente: elaboración propia.

Con el propósito de contribuir al diseño sísmico de estructuras de mampostería estructural en este trabajo, se establecen los niveles de deformación asociados con diferentes estados límite, entre los que se analizó el estado de daño límite controlado *ELDC*, (figura 2), en el cual se presenta la formación de un patrón estable de agrietamiento diagonal, donde el estado del muro permite repararlo en un tiempo razonable y no hay ningún riesgo para las personas y los contenidos, para lo cual se aprovecha la información de estudios experimentales de muros de albañilería confinada realizados en Chile, México y Venezuela.

En otras investigaciones de Astroza, desarrolladas en el año de 1992, donde las principales variables estudiadas fueron la influencia de la modalidad de refuerzo, del tipo de refuerzo y de la cuantía de refuerzo horizontal en los parámetros del comportamiento general de los muros, se señala que los muros de mampostería de bloque de concreto reforzados horizontalmente adquieren cierta capacidad de deformación posterior al agrietamiento, y con esto, logran disipar energía, siempre que el corte controle su comportamiento. Se recomienda el uso de la mampostería confinada por columnas exteriores y de mampostería reforzada con las cuantías mínimas de la norma chilena cuando se esperen niveles de deformación superiores a los que provocan el agrietamiento del panel de mampostería.

- Por su parte, Echevarría (1986) utilizó ladrillo industrial en la construcción de muros que ensayó ante carga lateral cíclica con carga vertical constante. La magnitud de esta última se cambió de modelo a modelo. Se mantuvieron constantes tanto el refuerzo longitudinal como el transversal de las columnetas, y se colocó refuerzo horizontal en uno de los modelos. Entre las conclusiones que Echevarría presenta están: que la carga de agrietamiento por flexión

se puede predecir mediante la resistencia a tensión por flexión del concreto (módulo de ruptura); que el incremento en la carga vertical produce un aumento en la resistencia al corte y que esta resistencia depende de la calidad de la mampostería exclusivamente. El autor sudamericano recomienda que los muros sujetos a cargas verticales moderadas y altas tengan una cuantía mínima de refuerzo horizontal del 0,100% para controlar el deslizamiento en la base del muro, y que se limite la magnitud del esfuerzo axial sobre muros de mampostería confinada, aun cuando se coloque el refuerzo horizontal recomendado.

- San Bartolomé (1994) ha llevado a cabo variadas experiencias en torno al tema de la mampostería y junto con otros ingenieros y estudiantes de la Pontificia Universidad Católica del Perú ha desarrollado diferentes trabajos de gran importancia. Realizó ensayos en muros no reforzados, con mochetas en sus extremos, los cuales fueron construidos con piezas de fabricación industrial. El ensayo se realizó aplicando una carga de compresión diagonal cíclica y variando la magnitud de la carga vertical de un muro a otro. La resistencia al corte fue ligeramente menor a la obtenida en muros similares de mampostería confinada, con fallas frágiles que redujeron drásticamente la resistencia y rigidez en el momento de la falla. En otros de sus estudios, analiza el comportamiento de la mampostería de concreto vibrado, a fin de proponer procedimientos constructivos complementarios y mejorando características como la adherencia de bloquero, para lo cual se desarrollaron diversos modelos de muros que fueron sometidos a ensayos de carga lateral cíclica (figura 3) y carga vertical (figura 4), entre otros.

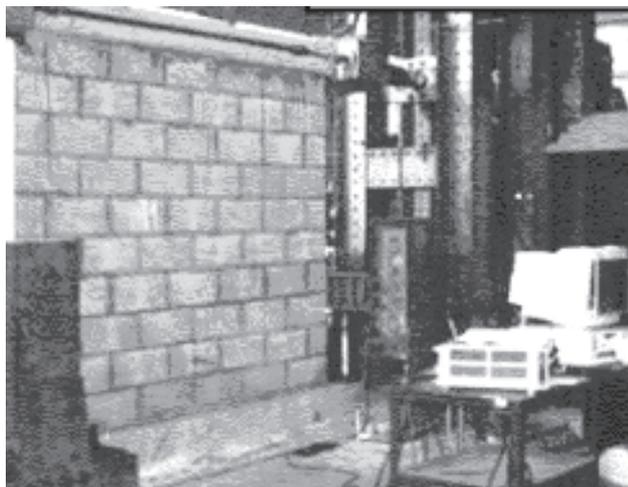


Figura 3. Carga lateral cíclica.

Fuente: elaboración propia.

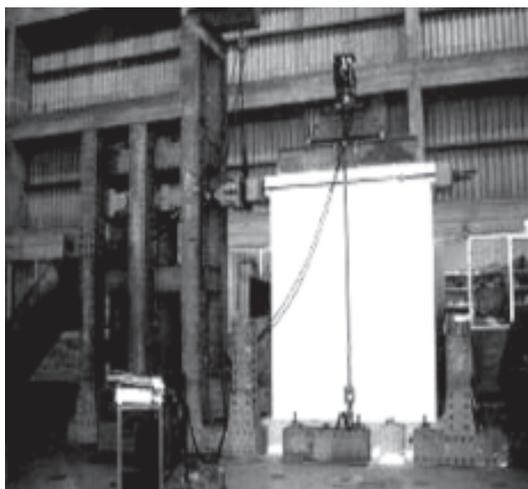


Figura 4. Muros sujetos a carga vertical

Fuente: elaboración propia.

Otro trabajo que se destaca y que cuenta con la participación de San Bartolomé es la correlación de resultados de ensayos entre especímenes a escala natural y probetas de tamaño reducido. Se construyeron 30 pilas, 30 mureles y 12 muros confinados que se ensayaron bajo distintas condiciones de carga, como compresión axial, compresión diagonal y fuerza cortante cíclica. Entre las principales conclusiones, producto de sus trabajos, se encuentran las siguientes:

- a) El empleo de cal en los morteros no produjo mayor variación en los resultados ya que la falla por tensión diagonal dominó en todos los muros. b) Los desplazamientos elásticos de los muros pueden predecirse mediante la resistencia de materiales modelando al muro como un voladizo con deformaciones por corte y por flexión. c) La resistencia al corte depende más de la calidad de la pieza que de las propiedades del mortero empleado en las juntas.
- Meli (1979) ejecuta una primera investigación en 1975, en donde se realizaron estudios de la variabilidad de los materiales constitutivos de la determinación de las propiedades básicas de esta mediante ensayos de pequeños especímenes y del comportamiento de la mampostería ante cargas reversibles y en una sola dirección.

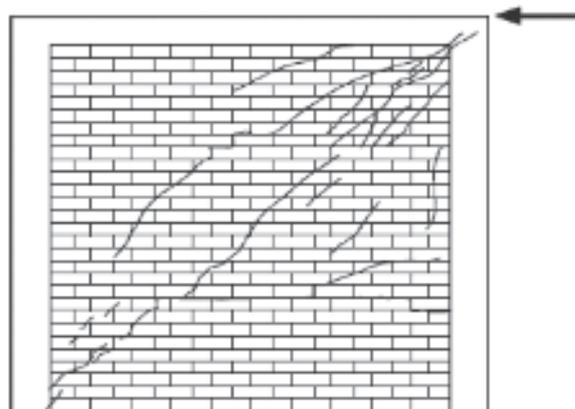


Figura 5. Ensayo en voladizo de un muro de mampostería confinada (Meli)

Fuente: elaboración propia.

- a) Los coeficientes de variación para las propiedades de los materiales involucrados en la construcción de la mampostería son muy altos. b) El comportamiento fue aproximadamente lineal hasta el primer agrietamiento, que se presenta por flexión o tensión diagonal. En el primer caso la

falla es dúctil, y en el segundo depende del tipo y cantidad de refuerzo interior y de las características de los elementos confinantes. c) La reserva de resistencia después del agrietamiento depende del tamaño de las columnetas de confinamiento y de la cuantía de refuerzo interior. c) La carga vertical provoca un incremento en la resistencia y en la rigidez, reduciendo la ductilidad del muro.

- En un segundo trabajo (Hernández y Meli, 1976), Meli efectuó la evaluación de distintas maneras de reforzar muros de mampostería con el objeto de incrementar su resistencia y ductilidad ante cargas laterales alternadas. También se evaluó el comportamiento de muros formados por bloques de concreto colocados con juntas secas (sin mortero), con refuerzo interior y un aplanado de mortero de alta adherencia que está compuesto de cemento, arena fina, aditivos especiales y un refuerzo a base de fibra de vidrio que le proporciona resistencia. El análisis cualitativo del comportamiento de los muros llevó a las siguientes conclusiones y recomendaciones para el detallado de muros de mampostería confinada con refuerzo interior:

- a) Un mejor comportamiento en términos de capacidad de absorción de energía, nivel de deterioro y reserva de resistencia después del agrietamiento se observa con la colocación de refuerzo horizontal adicional. b) El refuerzo horizontal resulta efectivo si está completamente recto y anclado a los extremos del muro. La adherencia no representa una variable importante en este sentido. c) Se deben realizar estudios adicionales para determinar un valor más adecuado de la cuantía mínima de refuerzo horizontal. d) El refuerzo horizontal debe estar distribuido unifor-

memente en la altura del muro para evitar concentraciones de esfuerzos. e) La carga de agrietamiento diagonal sólo depende de las propiedades de la mampostería. f) La colocación de refuerzo horizontal elimina prácticamente los daños locales en las piezas. Estos daños son los principales causantes del deterioro del muro.

- En este otro informe (Aguilar y Alcocer, 2001), se presentan los resultados del ensayo ante cargas laterales de cuatro muros de mampostería confinada reforzados horizontalmente con diferentes cuantías; se presentan recomendaciones para el análisis, diseño y construcción con esta modalidad de refuerzo.

De forma relevante para el estudio hecho, se comprobó la validez de la expresión correspondiente a la NTCM (*Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*) en relación con la cuantía mínima horizontal; mediante la aplicación de dicha expresión, se garantiza que con el refuerzo horizontal se tiene una resistencia ligeramente superior a la del muro sin refuerzo horizontal. Los autores recomiendan que se debe profundizar en el estudio del comportamiento de la mampostería ante cargas laterales. La influencia de los diferentes factores que afecten el comportamiento de las estructuras de mampostería también debe ser un tema importante de investigación.

- El trabajo de Tomažević y Velechovsky (1992) del Institute for Testing and Research in Materials and Structures ha sido uno de los principales del mundo que ha estudiado el comportamiento de la mampostería ante cargas sísmicas; a través de sus variados ensayos ha podido llegar a conclusiones como:
 - a) Se puede esperar una mejora en el comportamiento sísmico de muros de mampostería si se coloca refuerzo horizontal y vertical. b) El refuerzo horizontal tiene

una influencia mayor, ya que aumenta la capacidad al corte y la ductilidad, lo que conduce a la fluencia del refuerzo vertical y a un desarrollo completo de la capacidad a flexión de la sección.

Tomažević, junto con Zarnic, elaboró dos trabajos de gran importancia; en el primero se estudió el efecto del refuerzo horizontal en la resistencia lateral y la ductilidad de muros de mampostería; el segundo trabajo presenta un estudio muy similar en el que se ensayaron especímenes donde las variables de estudio fueron las mismas y se usaron morteros de alta resistencia para mejorar la adherencia y el anclaje del refuerzo horizontal, aun cuando el código esloveno prohibía su empleo en zonas sísmicas. De estos estudios pudieron especificar que:

- a) La resistencia al corte de los muros está regida por los refuerzos principales de tensión en el elemento, por lo que solo depende de las propiedades de las piezas y, en muy poca medida, de la resistencia del mortero.
- b) La eficiencia del refuerzo horizontal depende en gran parte de las condiciones de adherencia y anclaje de éste. Se incrementa con la resistencia del mortero y disminuye con la cuantía del refuerzo.
- c) La colocación de la cuantía mínima de refuerzo, correspondiente a la resistencia a carga lateral del muro sin refuerzo, resultó suficiente para aumentar la ductilidad. Cuantías superiores son antieconómicas ya que la eficiencia se reduce.

2.1 Investigaciones nacionales

Entre las principales instituciones que han adelantado proyectos destacados en el país se encuentran el Fondo Nacional de Prevención de Desastres y la Universidad de los Andes. En el año

de 1993, y de forma conjunta, las dos entidades nombradas anteriormente presentaron un informe preliminar relativo al ensayo de muros de mampostería confinada a escala natural, sometidos a carga vertical y horizontal de forma simultánea.

Los objetivos de este programa experimental incluían la actualización y recopilación bibliográfica relacionada con el comportamiento de la mampostería estructural, el ensayo de muros de mampostería confinada para estudiar su respuesta y formas de falla, el establecimiento de recomendaciones de diseño y normas de construcción, dar soporte experimental a los requisitos de futuras normas y proporcionar las herramientas básicas para reforzar la difusión de resultados, especialmente para el diseño y construcción de vivienda de bajo costo.

Las variables que se tuvieron en cuenta en este proyecto fueron la geometría, las propiedades mecánicas de los materiales, la disposición del refuerzo, el tipo de carga y la mano de obra. Otras variables como el tipo de ensayo (estático, dinámico, cíclico, carga controlada, etc.) también fueron incluidas.

3. PROCESO EXPERIMENTAL

A partir del principio del presente proyecto, en donde se toma como opción emplear un elemento adicional en el sistema que aporte al muro resistencia a los esfuerzos de corte, se escogió implementar dentro del muro (construido con bloques de arcilla cocida) un elemento de refuerzo como el acero grafilado. El grafil empleado cumple con las condiciones expresadas en la NSR-98 sobre refuerzo horizontal, y aunque las disposiciones de la norma no son específicas para un sistema de mampostería reforzada horizontalmente, sirven como referencia en la determinación de las variables del proyecto, las cuales son la cantidad y posición de refuerzo en un muro. Un grafil hace referencia a una varilla milimétrica de acero al carbono estirado en frío, lisa, y grafilada, calibrada y de alta resistencia. Entre sus propiedades

principales se encuentran la baja ductilidad, baja resistencia a la oxidación. Su resistencia nominal a la fluencia (f_y) es igual a 60000 Psi (420 MPa), según distribuidor (Organización G&J, Empresas de Acero). Se utiliza en la elaboración de mallas electrosoldadas, refuerzo en prefabricados, recubrimiento de varillas diversos usos (niquelado, cromado, galvanizado) y en especial como refuerzo para construcción. Su presentación está dada por diversos diámetros desde los 3,0mm hasta los 9,0mm y en longitudes de varilla de 6,0m para diámetros de 3,0, 3,5 y 4,0 mm. El grafil elegido fue uno de diámetro 4mm el cual presenta un peso de 0,59 Kg/m

3.1 Cuantía

Para definir la cuantía de acero de refuerzo para los muros, se siguió la recomendación de la NSR-98: D.7.3.1. a) “la cuantía de refuerzo evaluada sobre el área bruta de la sección del muro, en cada una de las direcciones, vertical y horizontal, no debe ser menor de 0,0007”, que aunque está dirigida a muros de mampostería reforzada construidos con unidades de perforación vertical, es empleada como referencia, como se dijo anteriormente.

$$\rho = \frac{A_v}{A_{netaM}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

ρ : Cuantía

A_v : Área del refuerzo horizontal

$A_{neta M}$: Área neta del muro

Tabla 1. Cuantía de refuerzo

Cantidad de grafiles por muro	A_v (mm ²)	$A_{neta M}$ (mm ²)	
5	62,83	60000	0.001
4	50,26	60000	0.0008

Fuente: elaboración propia.

3.2 Compresión diagonal

La prueba consiste en aplicar compresión en una de las diagonales de un muro de dimensiones aproximadamente cuadradas, en las que su longitud mínima está dada por la equivalente a una y media piezas. En este ensayo, en el muro se produce un estado de esfuerzos de compresión a lo largo de la diagonal en la cual se aplica la carga, pero al mismo tiempo se produce un estado de esfuerzos de tensión a lo largo de la diagonal perpendicular a la que se produce la compresión. En la figura 6, se muestra un esquema de este ensayo.

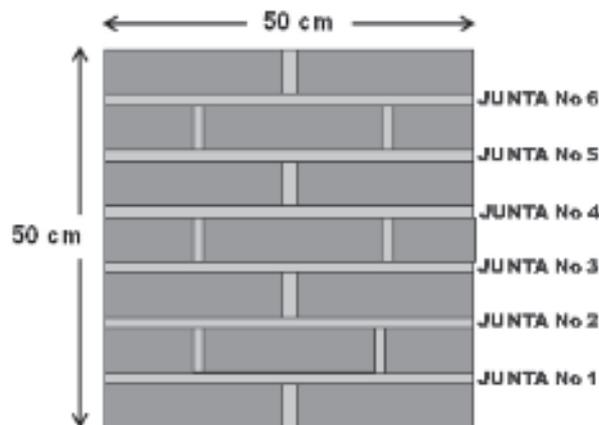


Figura 6. Esquema del murete para el ensayo
Fuente: elaboración propia.

3.2.1 Disposición de muros

Las propiedades de los muros para el ensayo de compresión diagonal fueron consideradas de acuerdo con las recomendaciones de las normas nacionales e internacionales ASTM, en la sección E 519-81 “Standard Test Method for Diagonal Tension (shear) in masonry Assemblages”, NTC 4925 “Ensayo de Compresión Diagonal en Muros de Mampostería” y en recomendaciones, resultado de diversas investigaciones basadas en los ensayos de este tipo. En el desarrollo del proyecto se elaboraron 25 muros para ensayos de compresión diagonal, los cuales se plantearon, considerando

como valores fijos el espesor vertical y horizontal del mortero de pega, las unidades mampuestas y el diámetro del refuerzo; de igual manera se consideraron como únicas variables la cantidad de refuerzo y su distribución en cada muro.

3.2.2 Dimensiones

Las especificaciones dimensionales de los muros que fueron empleados en el ensayo de compresión diagonal se establecieron a partir de la condición de que el tamaño del espécimen fuera representativo de un ensamble de mampostería de escala natural y que pudiera ser adaptado a las características de la máquina universal de pruebas disponible para el ensayo en el laboratorio. Se tuvieron en cuenta también recomendaciones de investigaciones extranjeras que indican que los muros deben presentar una longitud de al menos una vez y media la longitud de la pieza y el número de hiladas necesario para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud. Bajo las consideraciones anteriormente expuestas, fueron establecidas como dimensiones de los muros para el ensayo de compresión diagonal, una longitud de 50 cm, 50 cm de alto y espesor igual al de las piezas.

3.2.3 Tipos de muros

A partir de las variables establecidas, como lo son la cantidad de refuerzo (grafiles) y su distribución dentro de cada muro, se generaron 5 tipos de muros a construir, compuestos, a su vez, cada tipo por 5 especímenes de iguales condiciones. Se diseñaron y construyeron una serie de modelos de muros para ser sometidos a ensayo de compresión diagonal mediante la máquina de compresión diagonal. Se realizaron un total de veinticinco (25) modelos: cinco de ellos no presentaron ningún tipo de refuerzo; quince (15) modelos presentaron refuerzo doble en dos (2) de las juntas horizontales y los cinco (5) modelos restantes presentaron refuerzo sencillo en todas las juntas horizontales. Los tipos de muros escogidos se describen a continuación.

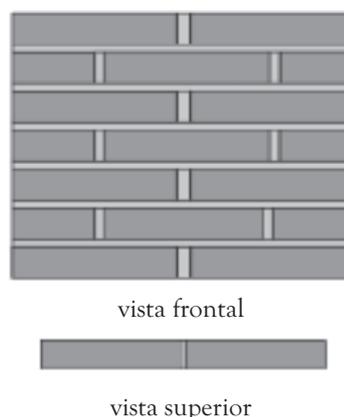


Figura 7. Estructura del muro tipo 1

Fuente: elaboración propia.

Muros tipo 1. Este tipo de muros no presenta en las juntas horizontales ninguna clase de refuerzo horizontal. **Muros tipo 2.** Este tipo de muros presenta en las juntas horizontales No. 3 y 4 dos grafiles embebidos en el mortero de pega y colocados en los límites del tercio medio con respecto al ancho del ladrillo. **Muros tipo 3.** Este tipo de muros presenta en las juntas horizontales No. 2 y 5 dos grafiles embebidos en el mortero de pega.

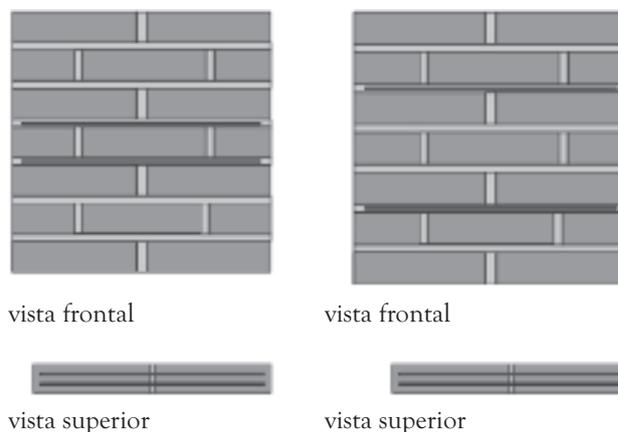


Figura 8. Estructura del muro tipos 2 y 3

Fuente: elaboración propia.

Muros tipo 4. Este tipo de muros presenta en las juntas horizontales No. 1 y 6 dos grafiles embebidos en el mortero de pega y colocados en los límites del tercio medio con respecto al ancho del ladrillo.

Muros tipo 5. Este tipo de muros presenta en cada una de las juntas horizontales un grafil embebido en el mortero de pega y centrado con respecto al ancho del ladrillo.

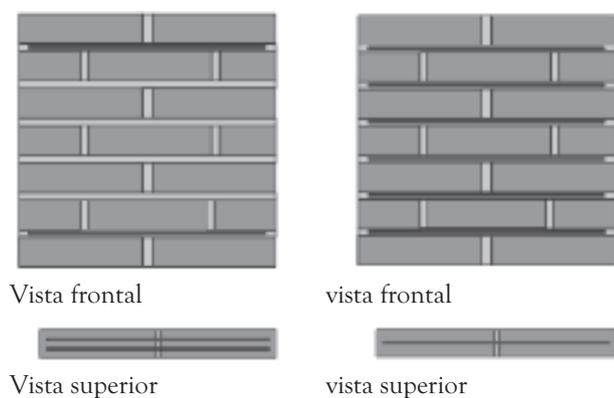


Figura 9. Estructura del muro tipo 4 y 5

Fuente: elaboración propia.

La construcción de los muros estuvo a cargo de un maestro de obra de la ciudad de Tunja, con experiencia en el sistema constructivo de mampostería, quien se encargó de la elaboración de la totalidad de los muros a fin de representar las características constructivas de la zona. Los muros fueron construidos en una bodega dentro de las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; durante los tres días siguientes fueron humedecidos una vez al día; en el período posterior fueron dejados en el ambiente de la bodega hasta que cumplieron los 28 días correspondientes a su tiempo de curado mínimo. Dentro del equipo básico para la realización del ensayo se emplearon entre otros:

3.2.4 Máquina de pruebas

Se utilizó la máquina universal de pruebas del laboratorio de suelos y materiales a disposición de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Se necesitaron dos unidades, una para ubicar en la parte inferior del muro y la otra en la parte superior. Las dos platinas de carga se adquirieron por la Escuela de Ingeniería Civil, y según sus características fueron elaborados en acero laminado en frío y otras especificaciones dadas en la norma ASTM.

4. RESULTADOS Y SU ANÁLISIS

En esta parte del trabajo se analiza el comportamiento físico y mecánico de los muros de mampostería al ser sometidos al ensayo de compresión diagonal, agrupando los modelos por tipologías de falla propuestas de acuerdo con las características particulares de las mismas; asimismo, se analizaron los resultados obtenidos tanto en cada muro como en cada tipo.

4.1 Tipologías de falla

Es importante estudiar el comportamiento de la mampostería ante la aplicación de carga en el ensayo de compresión diagonal, al inducir esfuerzos de compresión al muro; fueron de interés particular los mecanismos de falla como consecuencia de la prueba. La falla de un muro por efecto de fuerzas cortantes ocurre habitualmente a través de fisuras inclinadas ocasionadas por tensiones diagonales. Estas grietas se forman generalmente a lo largo de las juntas, generadas por la debilidad de la unión pieza-mortero; sin embargo, para piezas con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan el cuerpo del muro de formas variadas.

De acuerdo con el aspecto visual del muro en el momento de la falla, particularmente la trayectoria de ésta y su frecuencia en los diferentes muros, se proponen tres tipos de falla. Son descritas a continuación las tipologías de falla propuestas y sus principales características.

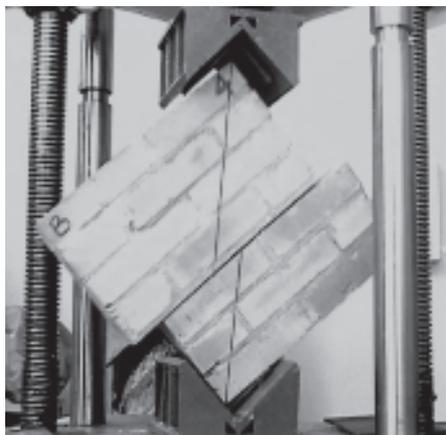


Figura 10. Falla por adherencia

Fuente: elaboración propia.

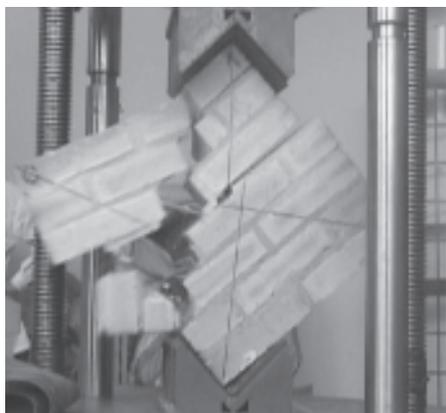


Figura 11. Falla combinada

Fuente: elaboración propia.



Figura 12. Falla semidiagonal

Fuente: elaboración propia.

4.1.1 Falla por adherencia

Esta tipología corresponde a aquella falla en que el agrietamiento se inicia y propaga por las juntas, y se genera cuando la resistencia de las piezas es mayor en relación con la resistencia de adherencia del mortero con las piezas, por lo que el agrietamiento ocurre en el elemento débil que, en este caso, es la junta. En este tipo de falla generalmente el muro se divide en dos secciones donde el mortero involucrado en la sector de la falla queda en solo una parte (superior o inferior) de las secciones del muro; generalmente se presenta deslizamiento de una sección del muro sobre la otra y, en ocasiones, despega algunas piezas con parte de mortero.

4.1.2 Falla combinada

Este tipo de falla se presenta normalmente cuando la resistencia a la tensión de las piezas es menor en relación con la resistencia de adherencia del mortero a las piezas. Se caracteriza porque los muros presentan agrietamiento y ruptura de algunas de sus piezas, al igual que del mortero; inclusive alcanzan a inducir que los grafiles (refuerzo horizontal) se doblen. Aun cuando este tipo de falla involucra piezas y mortero, no presenta una trayectoria afín a la diagonal cargada del muro.

4.1.3 Falla semi-diagonal

Esta falla habitualmente se observa cuando el esfuerzo resistente a la tensión de las piezas es semejante a la adherencia entre piezas y mortero; se da un modo de falla mixto en que el agrietamiento diagonal se da tanto en las piezas como en las juntas. En las figuras 3, 4 y 10 se muestran muros representativos de cada una de las tipologías de falla propuestas.

4.2 Comportamiento mecánico

El comportamiento mecánico de los muros de mampostería sometidos a la prueba de compresión diagonal hace referencia a la respuesta que el muro presenta frente a la condición de compresión dia-

gonal a la que es sometido. Al finalizar el ensayo se identifican valores de carga máxima y de rotura, así como su máxima deformación en el momento de la carga máxima y en el de la falla; a partir de éstos, se encuentra la resistencia a la compresión diagonal o cortante. Con la misma importancia de los valores de los resultados del ensayo, el comportamiento del muro durante la prueba, la trayectoria de la falla, así como el estado de daño y el comportamiento del refuerzo horizontal, se tienen en cuenta en la determinación de la respuesta del muro frente al ensayo de compresión diagonal; de modo que en el transcurso del ensayo y al final del mismo, se realizaron inspecciones al muro con el fin de establecer si las unidades o las juntas mostraban algún tipo de deterioro o señales particulares, datos que fueron registrados como “observaciones” en el formato correspondiente.

El comportamiento del muro durante la prueba puede observarse de forma detenida en secuencias fotográficas y videos del ensayo. Esta ayuda audiovisual junto con las observaciones registradas en los formatos correspondientes a cada muro permiten reconocer la conducta del muro en el momento que se presenta la falla y los detalles de la misma; de este modo es posible analizar el momento, dirección y trayectoria de la grieta originada por efecto de la compresión, así como dónde inicia y cuál es su secuencia de recorrido en el cuerpo del muro.

Con el propósito de determinar las deformaciones horizontales y verticales entre dos puntos internos del muro, fueron instrumentados cinco de los ensayos de compresión diagonal; la instrumentación de los ensayos se realizó mediante la implementación de deformímetros análogos con aproximación de 0,001 in.

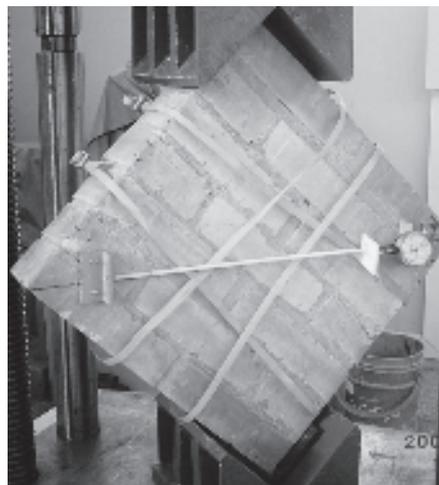


Figura 13. Ensayo instrumentado

Fuente: elaboración propia.

No en todos los casos fue posible determinar estas medidas, debido a que las deformaciones que se presentaron en los muros fueron de magnitudes pequeñas y aparecieron rápida y repentinamente en instantes previos a la falla especialmente en las deformaciones horizontales; por ello resultó dispendioso el trabajo de tomar la lectura de forma correcta; de este forma no se lograron registrar con precisión las deformaciones, razón por la cual no se tomaron en cuenta como resultado del ensayo. Las deformaciones que fueron registradas por la máquina universal de pruebas, en relación con la diagonal cargada del muro (vertical), se consideraron inexactas en cuanto a su magnitud, a razón de que las bandas de caucho colocadas entre el muro y los zapatos de carga pudieron presentar sus propias deformaciones hasta un punto en el que el muro empezaría a deformarse. El punto exacto en que el muro empieza a deformarse es muy complicado de determinar para cada ensayo desarrollado; y aunque las magnitudes de las deformaciones no sean precisas, para el análisis de los resultados se toma muy en cuenta la tendencia descrita por cada curva de *esfuerzo-deformación*, en particular, su parte final; cuando las deformaciones que se registran corresponden a las del muro al ser la conducta real de este frente al ensayo.



Figura 14. Descascaramiento de piezas durante el ensayo

Fuente: elaboración propia.

Al estar sometidos a la aplicación de carga, durante el ensayo, los muros experimentaron una serie de cambios en su estructura que se manifestaron en ruidos, descascaramientos de piezas, fisuras y deformaciones hasta llegar a la falla.

Teniendo en cuenta los resultados del ensayo de compresión diagonal, las consideraciones hechas al revisar las ayudas audiovisuales y las observaciones registradas en los formatos durante la prueba, se hace un análisis del comportamiento específico de cada uno de los muros, en particular, en el transcurso del ensayo, tipología de falla y curva esfuerzo deformación. Antes de comenzar con el análisis del comportamiento de los muros luego de

ser sometidos al ensayo de compresión diagonal, es conveniente recordar que todos los muros presentan las mismas características en cuanto a dimensiones, materiales, espesores de pega horizontal y vertical, mano de obra, almacenamiento y curado; igualmente, fueron sometidos a la prueba de compresión diagonal bajo el mismo procedimiento de ensayo basado en el mismo método del programa por computador empleado.

4.3 Comportamiento de los tipos de muros

Después de analizar cada uno de los muros en cuanto a sus características individuales y en relación con los otros de sus mismas condiciones, es preciso desarrollar ahora un estudio de los muros agrupados por tipos, en donde el esfuerzo cortante máximo, producto del ensayo de compresión diagonal, es el punto de referencia.

Una vez hallada la carga máxima de compresión diagonal soportada por los muros, se calcula el esfuerzo cortante f_v mediante la expresión:

$$f_v = \frac{0.707 \times P}{An} \tag{Ecuación (2)}$$

Donde:

f_v = Esfuerzo cortante (N/mm²).

P = Carga máxima soportada por el muro (N).

An = Área efectiva del muro para determinar esfuerzos cortantes mm².

Aplicando esta expresión a los datos obtenidos se tiene:

Tabla 2. Esfuerzo cortante máximo del ensayo de compresión diagonal.

MURO		An (mm ²)	P (N)	f_v (MPa)	f_v (Kg/cm ²)
TIPO 1	A	59940	34562,5	0,409	4,1
	B	59880	67578,1	0,798	8,0
	C	59680	46281,3	0,548	5,5
	D	60040	58015,6	0,680	6,8
	E	60820	55750,0	0,663	6,6

MURO		A_n (mm ²)	P (N)	f_v (MPa)	f_v (Kg/cm ²)
TIPO 2	A	58840	139594	1,668	16,7
	B	59840	103313	1,221	12,2
	C	59740	103641	1,227	12,3
	D	59940	85266	1,003	10,0
	E	59740	95719	1,133	11,3
TIPO 3	A	59380	69719	0,828	8,3
	B	59420	83234	0,990	9,9
	C	59920	79234	0,938	9,4
	D	60020	82844	0,976	9,8
	E	59700	72203	0,855	8,6
TIPO 4	A	59140	84063	1,005	10,0
	B	59560	62281	0,739	7,4
	C	59420	66797	0,795	7,9
	D	59580	59531	0,706	7,1
	E	59980	76031	0,896	9,0
TIPO 5	A	60000	85562,5	1,008	10,1
	B	59480	90093,8	1,074	10,7
	C	59780	90796,9	1,076	10,8
	D	59600	95671,9	1,135	11,3
	E	58760	74187,5	0,887	8,9

Fuente: elaboración propia.

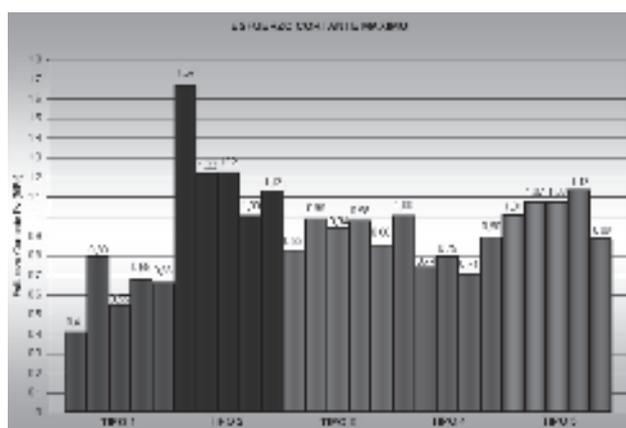


Figura 15. Esfuerzos cortantes máximos del ensayo de Compresión Diagonal.

Fuente: elaboración propia.

En la gráfica de barras de esfuerzos cortantes máximos del ensayo de compresión diagonal (figura 15) se observa el valor del esfuerzo cortante máximo para cada uno de los 25 muros sometidos al ensayo de compresión diagonal. Basados en los datos de esfuerzo cortante máximo producto del ensayo de compresión diagonal, registrados anteriormente y confrontados en la gráfica anterior, se buscó determinar un valor representativo de esfuerzo cortante para cada tipo de muro, de modo que se tomaron los valores más apropiados para obtener una desviación estándar que fuera la mínima aceptable para la muestra, y se alcanzaron los siguientes resultados:

Tabla 3. Esfuerzo cortante máximo de los tipos de muros

MUROS		f_v (MPa)	f_v (Kg/cm ²)	MEDIA (MPa)	DESV. ESTÁNDAR
TIPO 1	C	0.548	5,48	0,63	0,071
	D	0.680	6,80		
	E	0.663	6,63		
TIPO 2	B	1.221	12,21	1,19	0,053
	C	1.227	12,27		
	E	1.133	11,33		
TIPO 3	A	0.828	8,28	0,92	0,072
	B	0.990	9,90		
	C	0.938	9,38		
	D	0.976	9,76		
	E	0.855	8,55		
TIPO 4	B	0.739	7,39	0,75	0,045
	C	0.795	7,95		
	D	0.706	7,1		
TIPO 5	A	1.008	10,1	1,07	0,052
	B	1.074	10,7		
	C	1.076	10,8		
	D	1.135	11,3		

Fuente: elaboración propia.

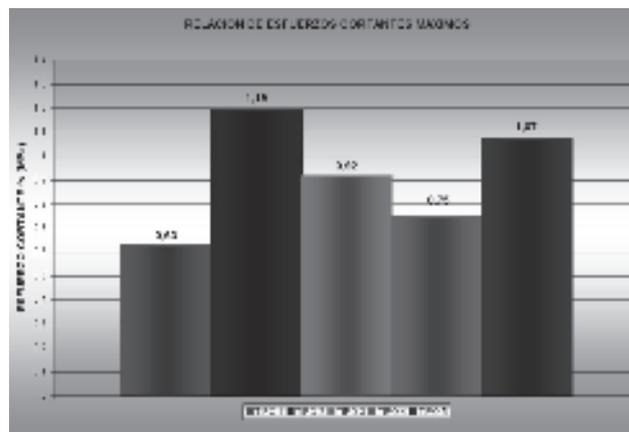


Figura 17. Esfuerzos cortantes máximos por tipo de muros

Fuente: elaboración propia.

A partir de los valores definitivos de esfuerzo cortante máximo para cada uno de los 5 tipos de muros, es posible reconocer un aumento particular en este valor para los tipos de muro con refuerzo horizontal frente a los muros sin refuerzo. Esta relación comparativa de valores se presenta a continuación:

Tabla 4. Esfuerzos cortantes máximos por tipo de muros

MUROS TIPO	ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO f_v (MPa)	INCREMENTO (MPa)
1	0,63	~
2	1,19	0.56
3	0,92	0.29
4	0,75	0.12
5	1,07	0.44

Fuente: elaboración propia.

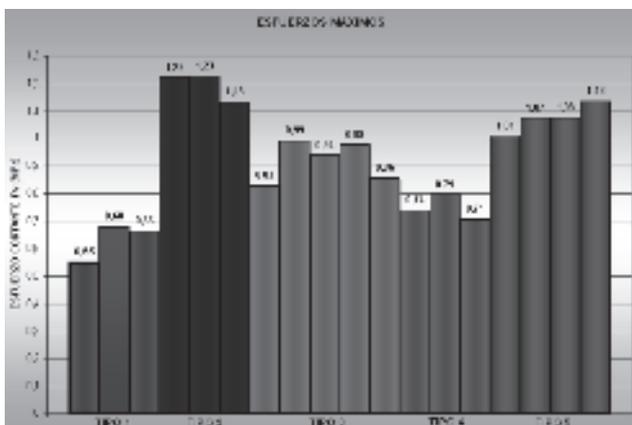


Figura 16. Esfuerzos cortantes máximos

Fuente: elaboración propia.

5. DISCUSION

- 1 Siendo los resultados de los ensayos de compresión diagonal comparables solo para muros con piezas del mismo tipo, en el desarrollo de este proyecto la implementación de refuerzo horizontal en los muros de mampostería permite que se presente un notable aumento en la resistencia al esfuerzo cortante frente a los muros sin refuerzo.
 - 2 El aumento en el esfuerzo cortante de los muros reforzados frente a los no reforzados está directamente relacionado con la ubicación de los grafiles en el muro, dado que entre más cercano al centro se localice el refuerzo, mayor es la resistencia ante las fuerzas de corte impuestas.
 - 3 A través de los ensayos de compresión diagonal y en particular de las trayectorias de falla manifestadas en los muros, se confirman las expresiones teóricas que indican que la falla por corte se origina en la sección central y se dirige hacia los extremos de la diagonal cargada del muro, como respuesta a la concentración de esfuerzos de compresión a lo largo de la diagonal vertical, y de tensión en la horizontal que combinados generan los esfuerzos de corte.
 - 4 La falla de los muros sometidos al efecto de compresión diagonal se originó en la sección media del muro, aunque no exactamente en el punto central, ya que este se ubicaba sobre una pieza, entonces la falla se originaba entre la pieza y una de las juntas contiguas en un punto cercano al central.
 - 5 La ubicación del refuerzo horizontal en el muro influye en el recorrido descrito por la línea de falla y denota desviaciones de la trayectoria como comportamiento generalizado en los muros reforzados; promueve, a su vez, que se presenten en estos muros varias tipologías de falla.
 - 6 Las deformaciones del muro durante el ensayo de compresión diagonal deben ser registradas por medio de mecanismos de precisión, porque el sistema empleado con deformímetros análogos registró la deformación de forma rápida y repentina en instantes previos a la falla, lo que impidió definir su magnitud correctamente.
 - 7 Los muros *tipo 1*, sin refuerzo horizontal, presentan un esfuerzo cortante máximo registrado en el ensayo de compresión diagonal de $0,60 \text{ MPa}$, valor tomado como referencia en la comparación con los otros tipos de muros.
 - 8 Los muros que muestran mayor esfuerzo cortante registrado en el ensayo de compresión diagonal son los *tipo 2*, aquellos que tienen refuerzo en las juntas No. 3 y No. 4; con una resistencia promedio de $1,19 \text{ MPa}$, que es casi 2 veces la resistencia a corte que presentan los muros no reforzados.
 - 9 Los muros *tipo 5*, con refuerzo horizontal en todas las juntas, soportaron en promedio esfuerzos cortantes de $1,07 \text{ MPa}$, y se ubica como un valor cercano a la resistencia de los muros del *tipo 2*; a su vez, duplica la resistencia de los muros sin refuerzo.
- Nota: Los valores expresados anteriormente corresponden a los resultados de ensayos experimentales desarrollados en el transcurso del presente proyecto.
- 10 Por seguridad se considera necesario que en el montaje del ensayo de compresión diagonal se rodeen los muros con cinta de zunchar sin ejercer presión en el muro, pues el momento de falla en este tipo de ensayo es de carácter inesperado y violento.

REFERENCIAS

- AGUILAR, G y ALCOCER, M.S., 2001. Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería confinada ante cargas laterales. México, 181 p.
- ASTROZA, MAXIMILIANO y SCHMIDT, ANDRÉS. (2004). Capacidad de deformación de muros de albañilería confinada para distintos niveles de desempeño. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (70): 59-75.
- DIEZ, J., 1987. Estudio experimental de muros de albañilería sometidos a carga alternada. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- ECHEVARRÍA, G., 1986. Ensayos de carga lateral en muros de albañilería confinada. Libro de Ponencias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Cajamarca. p87
- GALLEGOS, H., 2002. Las estructuras de mampostería. *En*: ICA (eds). Edificaciones de mampostería para vivienda. Capítulo 1. México D.F. p.3-15
- HERNÁNDEZ O. y MELI R., 1976 Modalidades de refuerzo para mejorar el comportamiento sísmico de muros de mampostería, Instituto de Ingeniería UNAM No. 382. México.
- LÜDERS. H e HIDALGO. P, 1986. Resistencia al esfuerzo de corte de muros de albañilería armada, DIE 82-1, Departamento de Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería, P. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- MELI R., 1979. Comportamiento sísmico de muros de mampostería. Instituto de Ingeniería, UNAM No. 352, México., 2ª. Edición.
- MIRANDA, E, 2002. Comportamiento mecánico de la mampostería confinada. *En*: ICA (eds). Edificaciones de mampostería para vivienda. Capítulo 4. México D.F. p.73-83
- NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, 2002. Tomo I. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Títulos A y D (NSR-98)
- NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Ingeniería Civil y arquitectura: NTC 3495, NTC 4205, NTC 3329
- SAN BARTOLOMÉ, A., 1994. Construcciones de albañilería -comportamiento sísmico y diseño estructural-. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. 228 p.
- THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1988. Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. (ASTM E 519)
- TOMAŽEVIČ, MIHA y VELECHOVSKY, TOMAŽ. (1992). Some aspects of testing small-scale masonry building models on simple earthquake simulators. *Earthquake eng. struct. dyn.*, 21(11): 945-963