



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Construcción)

COMPORTAMIENTO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA DE BLOCK HUECO SUJETO A CARGAS
LATERALES, REFORZADO CON VARILLAS DE FIBRA DE VIDRIO EN LAS JUNTAS DE
MORTERO
TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias L.T. Construcción

Presenta:

Roger Ulises Hernández Zamora

Dirigido por:

M.I. Rubén Ramírez Jiménez

SINODALES

M.I. Rubén Ramírez Jiménez
Presidente

Dr. Juan Ignacio Velázquez Dimas
Secretario

Dr. José Luis Reyes Araiza
Vocal

Dr. Moisés Arroyo Contreras
Suplente

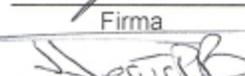
Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma
Dr. Inés Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Septiembre del 2013
México

RESUMEN

Los muros de mampostería son propensos a fallar cuando son sometidos a cargas laterales causadas por sismos o asentamientos diferenciales. Actualmente los polímeros fibro-reforzados (FRP) brindan una solución para contrarrestar dichos efectos, uno de los métodos de refuerzo más utilizados hoy en día es mediante tiras de FRP. El propósito de este trabajo de tesis es evaluar el incremento en la resistencia a cortante en muros de mampostería confinada, al reforzar las diagonales de este utilizando varillas de polímero fibro-reforzado (FRP) sobre las juntas horizontales de mortero. Para tal efecto se ensayaron dos muros de mampostería confinada a escala natural, contruidos con piezas de block y mortero tipo I. Uno de los muros se reforzó con varillas de fibra de vidrio (GFRP) colocadas horizontalmente sobre las juntas de mortero y cubrían 0.5 m de cada lado de las diagonales en ambas caras del espécimen, mientras que el otro muro se dejó sin reforzar. Se selecciono dicha técnica de refuerzo debido a que en estas zonas se genera la mayor concentración de esfuerzos. Se les aplicó carga axial constante simulando las cargas inducidas por una construcción de dos niveles y carga lateral cíclica reversible en su plano. De los resultados se concluye que la carga de agrietamiento fue la misma para los dos muros, sin embargo, el muro reforzado presentó un patrón de agrietamiento distribuido y de ancho menor que el correspondiente al muro sin refuerzo. Además éste exhibió una resistencia última 1.53 veces mayor que la del correspondiente al muro sin refuerzo, se estima que eso fue debido a que el sistema de refuerzo propuesto inhibió el agrietamiento en la diagonal sin necesidad de reforzar completamente todas las juntas de la mampostería.

(Palabras clave: mampostería, refuerzo, agrietamientos, varillas de GFRP)

SUMMARY

The masonry walls are prone to failure when subjected to lateral loads caused by earthquakes or differential settlements. Currently, fiber-reinforced polymers (FRP) provide a solution to counteract such effects. One of the most widely used reinforcement methods today is by using FRP strips. The purpose of this thesis is to evaluate the increase in shear resistance of confined masonry walls, to strengthen the diagonals of the rods using Fibro-Reinforced Polymer (FRP) on horizontal mortar joints. For this purpose, two full-scale confined masonry walls built with pieces of block and mortar type I were tested. One of them was reinforced with fiberglass rods (GFRP) placed horizontally on the mortar joints and covered 0.5 m on each side of the diagonals on both sides of the specimen, while the other one did not. This technique was selected because the highest concentration of efforts is generated in these areas. The walls were applied constant axial load simulating loads induced by a two-level construction and a reversible cyclic load in its plane. This experimental data showed that both walls showed the same cracking load, however, the reinforced wall showed better cracking pattern and smaller crack width. The reinforced one supported an ultimate load 1.53 times larger than the unreinforced wall, probably because the proposed reinforcement system inhibited the diagonal cracking without having to fully reinforce all the joints of the masonry.

(Key words: masonry, reinforcing, cracking, GFRP rods)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres Jesús Antonio Hernández Ontiveros y Martha Elvia Zamora García, que me han conducido con cariño y amor a lo largo de mi vida, por darme como regalo una carrera para mi futuro y por creer en mí, gracias por haber fomentado en mi el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida. Con mucho cariño para ustedes.

A mi Esposa, Zainukary Madrid Aranda, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, quien me ha enseñado a levantarme cuando he tropezado, pero más que nada por su amor.

Mis hermanos Jesús y Edna por estar conmigo y apoyarme siempre, por saber que siempre puedo contar con ustedes.

Por eso y por muchas cosas más, ¡GRACIAS!.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de tesis, el M.I. Rubén Ramírez Jiménez y Dr. Juan Ignacio Velázquez Dimas y por haber depositado en mí su confianza para llevar a cabo la realización de este proyecto.

Al Dr. José Luis Reyes Araiza y a la M.I. Basilia Quiñonez Esquivel por toda su disposición en colaborar y ayudar en la realización de este proyecto.

A mis compañeros y amigos, Julio Cesar González y Jesús García por su apoyo brindado en la realización de los ensayos.

A mi Esposa por haberme impulsado y apoyado incondicionalmente durante el estudio de mi licenciatura y especialmente en la realización de mi tesis.

Agradezco a mi familia por estar siempre pendientes en lo que acontece en mi vida, por brindarme su cariño y apoyo incondicional. Gracias a mis padres ya que son ellos quienes me han impulsado a culminar mis estudios.

Gracias a dios por darme todo lo que tengo.

ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de cuadros	vii
Índice de figuras	viii
I. INTRODUCCION	1
1.- Justificación	2
2.-Objetivo	4
3.-Hipótesis	4
4.-Análisis de resultados	5
II. REVISION DE LITERATURA	6
1.- Materiales utilizados en la construcción de mampostería	8
2.-Comportamiento mecánico de la mampostería	15
3.-Clasificación de muros de mampostería según el tipo de refuerzo.	19
4.-Comportamiento de muros de mampostería	21
5.-Estudios anteriores realizados a muros de mampostería	23
III. METODOLOGIA	40
1.-Descripción de los Especímenes	41
2.-Materiales	43
3.-Construcción de los Especímenes	48
4.-Refuerzo	52
5.-Instrumentación	54
6.-Descripción del Ensaye	56
IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES	59
1.- Definición de Parámetros	59

2. -Muro Confinado	62
3.- Muro Confinado-reforzado con varillas de GFRP	73
V. DISCUSIÓN	86
1.- Resistencia	86
2.- Rigidez	90
3.- Energía Disipada	93
4.- Energía Disipada Equivalente	94
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
LITERATURA CITADA	98
APÉNDICE	103

INDICE DE TABLAS

Cuadro		Página
2.1	Propiedades mecánicas de piedras naturales	10
2.2	Norma NMX aplicable dependiendo del tipo de Pieza	11
2.3	Características típicas de las piezas artificiales	13
2.4	Proporcionamientos recomendados para mortero en elementos estructurales	15
2.5	Valores indicativos de la resistencia a compresión diagonal	19
3.1	Propiedades físicas y mecánicas de las piezas	44
4.1	Valores máximos de carga para cada semi-ciclo con sus respectivas deformaciones y espesores de grietas (M1-SR)	65
4.2	Valores máximos de carga para cada semi-ciclo con sus respectivas deformaciones y espesores de grietas (M2-CR)	77
5.1	Resistencia a carga lateral y distorsiones correspondientes	89
5.2	Relación entre las resistencias de cada muro	89
5.3	Relación entre las resistencias y distorsiones del muro no reforzado respecto al reforzado	90
A.1	Propiedades físicas y mecánicas de las piezas	103
A.2	Resultado de los ensayos a compresión del mortero	104
A.3	Resultado de los ensayos a compresión diagonal de la mampostería	107
A.4	Resultado de los ensayos tensión de las varillas de GFRP	108

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Tipos de Mampostería de Piedras Naturales	9
2.2	Piezas en relieve para mampostería	10
2.3	Dimensiones y tipos de bloques de concreto	11
2.4	Pila para determinar la resistencia a compresión de la mampostería	16
2.5	Falla típica por tracción lateral	17
2.6	Murete para el ensaye a compresión diagonal	18
2.7	Modos de falla de ensayos de compresión diagonal	18
2.8	Mampostería Confinada	20
2.9	Mampostería reforzada	21
2.10	Modos típicos de falla en muros de mampostería sujetos a cargas laterales	23
2.11	Modelo trilineal para cargas monótonas en muros de mampostería	24
2.12	Arreglo de los muros de mampostería combinada y confinada (Colunga et al., 2007)	29
3.1	Geometría y dimensiones (en metros) de los especímenes	40
3.2	Esquema de armado de los elementos confinantes	40
3.3	Armado de castillos, dala y losa de carga	41

3.4	Esquema de refuerzo con varillas de GFRP del muro M2-CR	41
3.5	Piezas, pilas y muretes para la determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería	43
3.6	Cilindros de concreto y cubos de mortero para la determinación de la resistencia a compresión del concreto y mortero utilizados en los muros confinados	44
3.7	Sikadur 31 HMG, utilizado para la fijación de las Varillas de GFRP	45
3.8	Varillas de GFRP	46
3.9	Construcción de las vigas de cimentación	47
3.10	Alineación de la losas de Cimentación	47
3.11	Etapas de la construcción de los muros	49
3.12	Etapas del Refuerzo del muro M2-CR	51
3.13	Instrumentación utilizada en los especímenes	53
3.14	Instrumentación del acero en los castillos	53
3.15	Ubicación de los deformímetros eléctricos del Acero	54
3.16	Sistema de carga utilizado para el ensaye de los muros	56
3.17	Historia de carga recomendada por las NTCMRCDF	56
4.1	Detalle de barras diagonales	59
4.2	Muro M1-SR antes del proceso de carga	60
4.3	Historia de carga del Espécimen M1-SR	61
4.4	Ubicación de las grietas principales del muro M1-SR	62
4.5	Evolución del daño en el muro M1-SR	64
4.6	Evidencia del daño en el muro M1-SR	66
4.7	Curvas de histéresis del espécimen M1-SR	67

4.8	Comparación de los lazos histeréticos del Ciclo 1,5 y 12 (M1-SR)	67
4.9	Envolventes de Respuesta del espécimen M1-SR	68
4.10	Carga lateral-deformación unitaria del acero del muro M1-SR	69
4.11	Contribución a la distorsión total (M1-SR)	70
4.12	Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para cargas máximas (M1-SR)	70
4.13	Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para lateral igual a cero (M1-SR).	71
4.14	Muro M2-CR antes del proceso de carga	72
4.15	Historia de carga del Especimen M2-CR	73
4.16	Primer indicio de daños del muro M2-CR	73
4.17	Ubicación de las grietas principales del muro M2-CR	74
4.18	Evolución del daño en el muro M2-CR	76
4.19	Evidencia del daño en el muro M2-CR	78
4.20	Curvas de histéresis del espécimen M1-SR	79
4.21	Comparación de los lazos histeréticos del Ciclo 1,5 y 12 (M2-CR)	79
4.22	Envolventes de Respuesta del espécimen M1-SR	80
4.23	Carga lateral-deformación unitaria del acero del muro M2-CR	81
4.24	Contribución a la distorsión total (M2-CR)	82
4.25	Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para cargas máximas (M2-CR)	82
4.26	Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para carga lateral igual a cero (M2-CR)	83
5.1	Envolvente de respuesta primeros ciclos positivos del muro M1-SR	85

5.2	Envolvente de respuesta primeros ciclos positivos del muro M2-CR	86
5.3	Comparación Gráfica de ambos especímenes	87
5.4	Definición de rigidez del ciclo	89
5.5	Comparación de la degradación de la rigidez para ambos muros	90
5.6	Degradación de las rigideces normalizadas	91
5.7	Energía disipada acumulada de los muros	92
5.8	Definición de energía disipada equivalente	92
5.9	Energía Disipada Equivalente de los muros	93
A.1	Ensaye de absorción inicial y total de las piezas	104
A.2	Cubos y ensaye del mortero	105
A.3	Instrumentación y ensaye de muretes	105
A.4	Ensaye de las varillas de GFRP	107

I. INTRODUCCIÓN

La mampostería es un material ampliamente utilizado para la construcción de vivienda en el mundo y en particular en Latinoamérica, incluyendo México. El estudio del comportamiento estructural de edificaciones de mampostería es relevante en nuestro país por que la demanda de vivienda excede por mucho a la oferta disponible, y es deseable optimizar el empleo de materiales de manera de lograr una seguridad estructural aceptable (Rodríguez, 2004).

El sistema estructural más empleado en la construcción de viviendas en nuestro país es a base de muros de mampostería, generalmente confinada con dalas y castillos. Estas estructuras son susceptibles a fallar cuando son expuestos a eventos como sismos, sobrecargas, debilidad estructural y/o asentamientos diferenciales. Debido a lo anterior es que surge la necesidad de reforzar o rehabilitar la mampostería para mejorar su comportamiento ante este tipo de solicitudes.

En la actualidad existen diversas técnicas tradicionales para reforzar o reparar muros de mampostería, como por ejemplo el mortero lanzado, inyección de mortero, acero de refuerzo horizontal sobre las juntas de mortero, celdas rellenas de concreto reforzadas con acero vertical y refuerzo con mallas electro-soldadas; sin embargo, aunque esta técnicas han resultado satisfactorias presentan desventajas como largos periodos de instalación, resultan muy costosas, disminución de espacios y el aumento del peso de la estructura provocando mayor requerimiento de acero en la cimentación. Debido al buen desempeño de los compositos Fibro-reforzados en la industria automotriz y aeronáutica se consideró que dichos materiales pueden desempeñar un buen papel en el reforzamiento de elementos estructurales en el área de ingeniería civil. Es por esto, que surgen nuevas técnicas de refuerzo y rehabilitación a base laminas de Polímero Fibro-Reforzado (FRP), pero en ocasiones tienen el inconveniente de ser imprácticas y costosas ya que la superficie de instalación requiere ser preparada aumentando el tiempo de instalación.

Es por ello que en la presente investigación se propone una alternativa diferente al utilizar varillas de fibra de vidrio y resina poliéster (GFRP) como elemento de refuerzo estructural o de rehabilitación colocado sobre la juntas de mortero en muros de mampostería confinados ya construidos. Para ello se construyeron y ensayaron dos muros de mampostería de block de concreto hueco confinados a una escala natural siguiendo las recomendaciones Normas Técnicas Complementarias para Mampostería del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTCMRCDF 2004), uno de los muros fue reforzado una vez construido con varillas de GFRP en las juntas horizontales de mortero, cubriendo cierta longitud a cada lado de las diagonales principales. El otro muro fue ensayado sin refuerzo alguno y fue utilizado como muro patrón. Los muros fueron ensayados con carga axial y carga cíclica lateral en el extremo superior para validar la resistencia al cortante.

Con el objeto de determinar su carga de agrietamiento, su carga última, su rigidez lateral, y su distorsión angular, se colocaron medidores de deformación en la superficie de los muros y medidores de deformación eléctricos en el acero de los castillos. De acuerdo con los resultados obtenidos durante el ensaye se determinó la contribución del refuerzo con varillas de GFRP en las juntas de mortero a la resistencia al cortante y a la rigidez de los muros, tomándose como referencia los valores encontrados en el muro de mampostería confinado de block sin refuerzo. Esta Investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) en colaboración con la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) gracias al convenio que existe entre ambas universidades y al programa de vinculación académica.

1.-Justificación

Durante su vida útil una estructura de mampostería está sometida a efectos debido a la carga vertical por el peso de las losas, el peso de las cargas vivas y su peso propio, además, a las fuerzas cortantes y momentos de volteo (flexión) originados por las fuerzas de inercia durante un sismo, así como, a empujes

normales al plano de los muros que pueden ser causados por el viento, tierra o agua.

Las acciones mencionadas en el párrafo anterior, puede ocurrir la falla de la mampostería. La falla por carga axial es poco probable que ocurra debido a que el área de los muros es grande; sin embargo, podría ocurrir si las piezas son de mala calidad o si han perdido capacidad de carga por efecto de intemperismo. Cuando el material es de mala calidad la falla por carga axial se identifica porque en el muro se presenta aplastamiento, y cuando el material es de buena calidad, aparecen numerosas grietas verticales.

La falla por tensión diagonal es la que con mayor frecuencia se produce en un muro de mampostería. Existen muchas situaciones en las que un muro de mampostería puede estar sometido a tensión diagonal, por ejemplo el efecto de las cargas sísmicas es una de las situaciones más importantes; sin embargo, existen otras causas que pueden producir la tensión diagonal en la mampostería, por ejemplo, hundimientos diferenciales en una edificación, o bien, aún bajo la acción de cargas gravitacionales, cuando existe una distribución poco uniforme de cargas verticales en un determinado muro. La resistencia a tensión diagonal es una de las variables que mas influye en el comportamiento de sistemas constructivos a base de muros de mampostería.

Debido a lo anterior es que surge la necesidad la necesidad de desarrollar sistemas alternativos y eficientes para el reforzamiento de muros de mampostería. En las últimas décadas, se han desarrollado diversos estudios experimentales y analíticos para evaluar diversas técnicas de refuerzo y de rehabilitación en muros de mampostería sujetos a fuerzas en el plano. Durante los últimos años en diversos países de Europa, en Japón, en Canadá y en Estados Unidos se han enfocado en la utilización de los materiales compuestos para el refuerzo o rehabilitación de estructuras de concreto o de mampostería, sin embargo en México existen pocos reportes de investigación sobre el uso de dichos materiales.

En la actualidad el uso de materiales compuestos es objeto de investigación, y quienes lo han hecho (Tumialan et al., 2001; J. Velásquez; B. Quiñones, 2007; ElGawady et al., 2007) concluyen que estos materiales son apropiados para reforzar o rehabilitar estructuras de mampostería, incrementando la resistencia a flexión fuera del plano, y la capacidad de deformación e incrementa la resistencia a cortante ultimo.

Además, sumado a esto, la falta de investigación en México relacionada con el uso de materiales compuestos en el refuerzo o rehabilitación de muros de mampostería y la evidencia de la diferencia en las características tanto físicas como mecánicas de la mampostería sobre todo en nuestra región con respecto del resto del mundo surge la necesidad de valorar la aplicabilidad de las técnicas de refuerzo o rehabilitación con material compuesto en las edificaciones de mampostería.

En esta etapa del programa se ensayaron dos muros de mampostería de block. Se seleccionó dicha mampostería para este estudio debido a que actualmente, en el estado de Sinaloa, es la más utilizada en el desarrollo de vivienda de interés social.

2.-Objetivo

Evaluar el incremento en la resistencia a cortante en muros de mampostería confinada, al reforzar las diagonales de este utilizando varillas de Polímero Fibro-Reforzado (FRP) sobre las juntas horizontales de mortero.

3.-Hipótesis

Al reforzar un muro de mampostería confinado de block de concreto hueco con varillas de Polímero Fibro-Reforzado (FRP), colocadas horizontalmente sobre las juntas de mortero, cubriendo el área de las diagonales, se mejora la resistencia a cortante.

4.-Análisis de resultados

Se elaboraron graficas carga-distorsión lateral, carga-esfuerzo para cada varilla de acero instrumentada, se determinó la rigidez de ciclo del muro, así como también gráficas de energía disipada, se compararon cada uno de los parámetros medidos o calculados en cada uno de los muros.

Los resultados del trabajo de investigación desarrollado se presentan en seis capítulos. En el capítulo 1 se presenta la descripción del problema, la justificación, así como los objetivos y las hipótesis de dicha investigación. El capítulo 2 contiene una pequeña reseña histórica de la mampostería, las piezas de block y de tabique, mortero, tipos de mampostería, patología de la mampostería y antecedentes de investigaciones realizadas a muros de mampostería. En el capítulo 3 se plantea, la descripción de los especímenes, las propiedades de los materiales, la descripción del sistema de carga y la instrumentación colocada en los muros. En el capítulo 4 se describe el procedimiento de carga, así como la evolución del daño provocada a los muros. Se presenta el análisis de resultados y la comparación en el comportamiento de dichos muros en el capítulo 5 y por último, en el capítulo 6 se plantean las conclusiones originadas a partir del análisis de resultados.

II. REVISION DE LITERATURA

Este capítulo contiene una breve reseña del desarrollo de la mampostería, su clasificación y las propiedades de los materiales utilizados para su construcción. Además, se presenta un resumen sobre investigaciones realizadas a muros de mampostería y la aplicación de Polímeros Fibro-Reforzados (FRP) en muros, realizadas en el mundo y América Latina.

Desde los tiempos antiguos hasta nuestros días, se puede apreciar una gran variedad de ejemplos de construcciones espectaculares de mampostería, que podría ser muy difícil y extremadamente costoso el poder duplicarlas hoy en día, aun y con nuestros avances en materia de diseño, maquinaria y técnicas modernas de producción de materiales de construcción. Al observar el uso que se le dio a la mampostería en el pasado podemos entender de una mejor manera la perspectiva del diseño actual. En ocasiones la estructuración de las construcciones antiguas sirve como modelo de inspiración para el diseñador, ya que desde el punto de vista analítico, los ejemplos de formas estructurales sofisticadas se establecieron hace poco más de 10000 años.

La disponibilidad de los materiales, la habilidad de construcción, el planteamiento usado en el diseño y los costos de construcción son factores que a través de la historia han sido limitantes para el desarrollo de las estructuras de mampostería. La importancia de cada uno de estos factores ha variado con el tiempo. Hoy en día, el factor de costo de construcción se ha convertido en la mayor limitante de las estructuras de mampostería.

Una gran cantidad de materiales han sido utilizados como mampostería. Cuando las civilizaciones se desarrollaban a las orillas de los ríos, los depósitos aluviales eran utilizados para formar tabiques.

La cultura mesopotámica se ubicó entre los ríos Tigris y Éufrates, y creó toda una arquitectura con tabiques, por su parte, los pueblos que existieron en las vecindades de las montañas utilizaron rocas. A lo largo del valle del Nilo, los egipcios construyeron una gran cantidad de monumentos de roca. En las regiones

árticas se han utilizado los bloques de hielo para formar iglúes, mientras que en las ciudades modernas el vidrio es utilizado para formar muros de mampostería. Ahora los materiales comunes de mampostería se hacen con rocas, arcilla, silicato de calcio y concreto

La primera mampostería fue un conjunto de agregados naturales que eran seleccionados y se apilaban usando tierra como mortero entre ellos. Actualmente el uso que se da a las rocas no es de tipo estructural, sino más bien como fachada. El basalto y el granito son algunos tipos de roca utilizados en las construcciones de mampostería.

En Babilonia, Egipto, España, centro y Sudamérica se utilizaron los tabiques de arcilla secados al sol, los cuales surgieron en la construcción hace poco más de 10000 años. El proceso de fabricación de tabiques en Europa, por lo menos en Roma, tomaba un largo tiempo, ya que se requería que los tabiques secados al sol tuvieran al menos cinco años antes de ser utilizados en la construcción.

La producción mecanizada de tabiques se inicio en 1858, a pesar de que la primera máquina para fabricar tabiques se patento en 1619. Esta producción mecanizada a través de la introducción del horno Hoffman Kiln, el cual permitió que el curado de tabique formara parte del proceso continuo de producción. En la actualidad, el proceso completo de producción de tabiques (mezclado, vaciado en moldes, secado, curado, almacenamiento y entrega) está altamente mecanizado y puede realizarse en menos de una semana.

Asimismo se fueron incorporando nuevos métodos y materiales para la fabricación de la mampostería como lo son los tabiques de silicato de calcio que en un principio se hacían moldeando el mortero de limo en forma de tabique y permitiendo que se seicara al sol. En estados unidos, en 1886, con la introducción del vapor el proceso de producción se aceleró gradualmente, pero este continuó siendo muy lento.

En Alemania, en 1894, la presión de vapor fue utilizada para el curado de las unidades de silicato de calcio, y el resultado de ello fue la producción rápida de unidades de mampostería de dicho material.

Otro de los materiales que se incorporó en el uso en la mampostería fue el concreto siendo este uno de los más utilizados en la construcción de viviendas en serie en la actualidad.

Las primeras unidades de mampostería de concreto aparecieron casi al mismo tiempo que el proceso de curado a vapor de las unidades de silicato de calcio y del desarrollo de cementos de mejor calidad.

Los primeros bloques de concreto no fueron muy populares, debido a que eran sólidos, y por lo tanto bastante pesados. Las técnicas para fabricar bloques de concreto con huecos en moldes de madera se desarrollaron alrededor de 1866.

En 1914, el vaciado mecánico reemplazo al proceso manual y en 1924 se introdujo la primera máquina mezcladora al proceso de producción, un avance aun mayor se logro en 1939, con la introducción del mezclado por medio de vibración.

Las técnicas de curado también progresaron; se reemplazo el curado al aire con: curado con vapor de agua, curado con presión atmosférica, curado con vapor a alta presión y sistemas de curado con calor.

1.- Materiales utilizados en la construcción de mampostería

Se le denomina mampostería al material formado por un conjunto de piezas naturales o artificiales, unidas o sobrepuestas. Las zonas de contacto entre las piezas o piedras individuales constituyen planos de debilidad para la transmisión de esfuerzos de tensión y de cortante. La unión entre las piedras individuales se realiza por lo general por medio de juntas de morteros de diferentes composiciones. La mampostería de piedras artificiales está formada por piezas de tamaño pequeño con relación al elemento constructivo que con ellas se integra. Las piezas pueden tener una gran variedad de formas y materiales constitutivos; entre los más comunes se encuentran:

- tabiques;
- bloques de cemento prefabricados;
- piedras, talladas en formas regulares o no.

1.1.-Unidades o Piezas

El componente básico para la construcción de mampostería es la unidad o pieza que por su origen puede ser natural o artificial.

1.1.1.-Piezas Naturales

Las unidades de piedra natural se utilizan sin labrar o labradas. En México suelen distinguirse los siguientes tipos de mampostería de acuerdo con la forma en que ha sido labrada la piedra natural (Figura 2.1).

- Mampostería de primera. La piedra se labra en paralelepípedos regulares con su cara expuesta de forma rectangular. Las unidades de piedra de este tipo reciben el nombre de sillares.
- Mampostería de segunda. La piedra se labra en paralelepípedos de forma variable siguiendo la configuración natural con que llega de la cantera.
- Mampostería de tercera. La piedra se utiliza con la forma irregular con que llega de la cantera, aunque procurando que la cara expuesta sea aproximadamente plana.

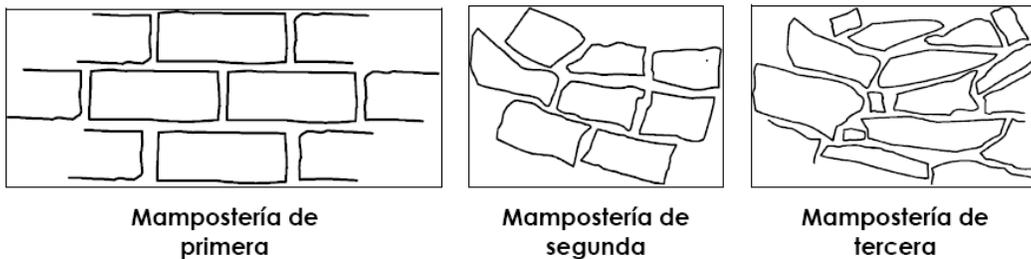


Figura 2.1. Tipos de mampostería de piedras naturales (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

Las piedras utilizadas tienen propiedades muy variables. En la tabla 1.1 se dan características aproximadas de algunas piedras comúnmente usadas en la construcción (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

Tabla 2.1. Propiedades mecánicas de piedras naturales (Robles y otros, 1984).

Piedra	Peso volumétrico seco (t/m ³)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a tensión en flexión (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)*10 ³
Areniscas	1.75 – 2.65	150 – 3200	60 – 120	40 – 200
Basaltos (piedra braza)	2.30 – 3.00	800 – 5800	200 – 300	100 – 300
Granito natural	2.40–3.20	800 – 3000	100 – 200	400 – 500
Mármol	2.40–2.85	300 – 3000	35 – 200	900

1.1.2.-Piezas Artificiales

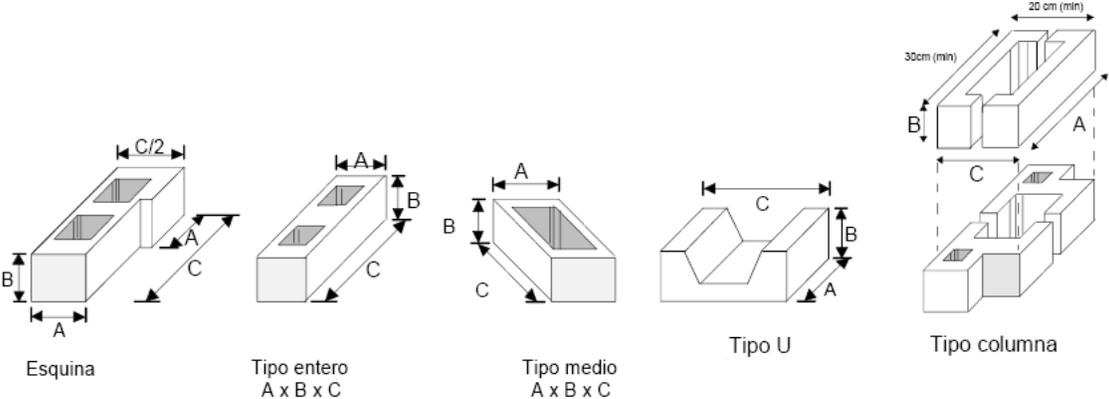
Existe una gran variedad de piezas de mampostería (piedras artificiales) que se utilizan en la construcción. Estas difieren entre sí tanto por la materia prima utilizada, como por las características geométricas de las piezas y por los procedimientos de fabricación empleados (Figura 2.2 y 2.3). Las materias primas más comunes son el barro, el concreto, con agregados normales o ligeros, y la arena con cal.



Figura 2.2. Piezas en relieve para mampostería.

Los procedimientos de construcción son muy variados: desde los artesanales como el cocido en horno para los tabiques comunes, hasta los

industrializados (vibro-compactación, para los bloques de concreto, y extrusión para el bloque hueco de barro). La forma es prismática pero con distintas relaciones entre las dimensiones. Es recomendable que las piezas usadas en los elementos estructurales de mampostería cumplan los requisitos de calidad para cada material especificados en las Normas Mexicanas (NMX).



Tipo entero	Tipo medio	Esquina	Tipo U	Tipo columna
A x B x C				
10x20x40	10x20x20		12x20x40	20x20x40
12x20x40	12x20x40	12x20x40	12x20x20	22x20x40
15x20x40	15x20x40	15x20x40	15x20x40	25x20x40
20x20x40	20x20x40		15x20x20	30x20x40
			20x20x40	
			20x20x20	

Figura 2.3. Dimensiones y tipos de bloques de concreto.

De acuerdo con la Norma Mexicana NMX-C-404 y con las NTCMRCDF, las piezas para uso estructural pueden ser macizas o huecas. Se define a las piezas macizas como aquellas cuya área neta sea igual o mayor al 75% de su área total (bruta) en la sección transversal más desfavorable. Para definir las piezas huecas la norma NMX-C-404 admite que posean huecos verticales u horizontales y con área neta no menor al 40% del área bruta. Sin embargo, las NTCMRCDF admiten solamente piezas con hueco vertical (ortogonal a la cara de apoyo que se colocará horizontal), y sólo acepta como huecas a las piezas con no menos del 50% de la relación de área neta a área bruta. Las piezas que no cumplan con alguna de las

anteriores especificaciones no podrán ser empleadas para uso estructural, aunque sí para otros usos.

Por otro lado, para las piezas huecas la NMX-C-404 pide un espesor mínimo de las paredes exteriores de 20 mm, mientras que las NTCM admiten que sea de 15 mm. En ambas reglamentaciones, para piezas huecas con 2 hasta 4 celdas, el espesor mínimo de las paredes interiores deberá ser de 13 mm y para piezas multiperforadas, con perforaciones de las mismas dimensiones y cuya distribución sea uniforme, el espesor mínimo de las paredes interiores es 7 mm.

La tabla 2.3 proporciona características representativas de las propiedades mecánicas de las piezas de uso más frecuente. La tabla da rangos de valores de pesos volumétricos medios, resistencias medias a compresión y coeficientes de variación de las resistencias obtenidas de muestras de piezas fabricadas por distintos productores (Robles et al., 1984). Aún cuando estos datos se obtuvieron en la década de los 70, es preocupante encontrar en la actualidad, para algunas piezas, valores similares o mayores de coeficientes de variación.

El adobe es un material de gran importancia en el medio rural. Se trata de un tabique de barro sin cocer, normalmente mezclado con fibras de distintos tipos (estiércol, paja, hojas, etc.) y secado al sol al aire libre. Su resistencia a la compresión es del orden de 15 kg/cm². El tabique suelo-cemento es un material que parece de interés por su bajo costo. Se fabrica mezclando suelos de ciertas características con cemento portland (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

Tabla 2.3 Características típicas de las piezas artificiales (Robles et al., 1984).

Material	Resistencia a compresión f_p (kg/cm ²)	Coefficiente de variación, cv	Peso volumétrico (t/m ³)	
Tabique rojo de barro recocido	35 – 115	10 – 30	1.30 – 1.50	
Tabique extruído perforado verticalmente	150 – 430	11 – 25	1.65 – 1.96	
	310 - 570	15 - 20	1.61 - 2.06	
	150 – 400	11 - 26	1.66 - 2.20	
Tabique extruído macizo	375 – 900	5 – 16	1.73 – 2.05	
Tabique extruído, huecos horizontales	75 - 80	13 - 18	1.25 - 1.32	
	50 – 80	16 – 30	1.69 – 1.78	
Bloques de concreto				
	Ligero	20 – 50	10 – 26	0.95 – 1.21
	Intermedio	20 – 80	7 – 29	1.32 – 1.70
Pesado	70 – 145	7 – 28	1.79 – 2.15	
Tabicón	45 – 120	11 – 35	1.05 – 1.6	
Silicio Calcáreo	175 – 200	11 – 15	1.79	

1.2.3.- Mortero

El mortero es una pasta formada por una mezcla de cemento, agua y agregado fino como la arena. Es esencial en construcción ya que es el material con el que se pegan los bloques de construcción como ladrillos, piedras, bloques de concreto, etc. Además, se usa para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para revocar las paredes.

Se trata de un material indispensable para la construcción que siempre ha estado sujeto a cambios con el objeto de mejorar sus beneficios, se define como la mezcla de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos, agua y, a veces, adiciones de aditivos.

Actualmente, hay muchas clases de morteros, entre los más comunes podemos encontrar el mortero de cemento y arena, que presenta mucha resistencia y se seca y endurece rápidamente. Su desventaja es que no tiene mucha flexibilidad y se puede resquebrajar con facilidad. Otro mortero es hecho de cal y arena. Es más flexible y fácil de aplicar, pero no es tan resistente ni impermeable. También se usa el mortero compuesto de cemento, cal y arena, que permite las ventajas de los dos morteros anteriores. Para lograr más resistencia, se aplica más cemento; si se prefiere mayor flexibilidad, se usa más cal.

Sus características más importantes son su probada resistencia, su gran fuerza de cohesión, su adherencia al soporte, su capacidad impermeable, su cada vez mayor rapidez al fraguar, su estabilidad con el paso del tiempo, etc.

La investigación ha desarrollado morteros de alta calidad gracias a la mezcla estudiada de varios componentes. Las cantidades de los elementos que los conforman deben utilizarse en proporciones muy determinadas para darle homogeneidad al mismo.

Gracias a la experimentación, los morteros actuales han mejorado considerablemente. Hay que valorar el estado del mismo, tanto cuando está húmedo, como cuando ya ha fraguado y resulta esencial el hecho de que no segregue.

Los ingredientes inorgánicos del mortero pueden ser el cemento en cualquiera de sus tipos; ya sea blanco, común o con alguna resistencia añadida, la cal y el yeso, sobre todo en los morteros que se utilizan para revocar y enlucir. Algunos de los aditivos que completan a los morteros son los plastificantes, los impermeables o los retenedores de agua, mientras que, en lado de las adiciones, encontramos el humo de sílice y los materiales puzolánicos. Además del agua, cuentan con áridos naturales o artificiales y con distintos tipos de fibras.

En el mercado hallaremos diferentes tipos de este material, ya sean morteros para juntas finas o gruesas, de carácter ligero o de origen industrial. Estos últimos se dividen en secos y húmedos y se trata de morteros que son suministrados en la obra.

La clasificación del mortero según las NTCMRCDF en base a su resistencia a compresión que va desde 40 kg/cm^2 para el mortero Tipo I, 75 kg/cm^2 para el mortero Tipo II y 120 kg/cm^2 para el mortero Tipo III (Tabla 2.4).

Tabla 2.4 Proporcionamientos recomendados para mortero en elementos estructurales (NTCMRCDF).

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena ¹	Resistencia nominal en compresión, f_j^* , MPa (kg/cm ²)
I	1	—	0 a 1/4	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen	12.5 (125)
	1	0 a 1/2	—		
II	1	—	1/4 a 1/2		7.5 (75)
	1	1/2 a 1	—		
III	1	—	1/2 a 1 1/4		4.0 (40)

¹ El volumen de arena se medirá en estado suelto.

2.-Comportamiento mecánico de la mampostería.

Las propiedades mecánicas de la mampostería son más variables y difíciles de predecir que las de otros materiales estructurales como el concreto reforzado o el acero. Esto es debido al poco control que se tiene sobre las propiedades de los materiales componentes y sobre los procedimientos de construcción empleados. Así, el comportamiento estructural de la mampostería, ha sido objeto de una amplia gama de estudios experimentales y analíticos, que han dado como resultado la elaboración de normas para el control de calidad de los elementos que la constituyen, así como para el diseño y construcción del producto compuesto (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

2.1.-Resistencia a compresión de la mampostería.

El ensaye que se utiliza para obtener un índice de la resistencia a compresión de la mampostería y para estudiar la forma de relación esfuerzo-deformación y el efecto de las diferentes variables, es el de una pila o prisma formado por varias piezas sobrepuestas (Figura 2.4).



Figura 2.4. Pila para determinar la resistencia a compresión de la mampostería.

El comportamiento y los modos de falla de la mampostería ante cargas axiales dependen en forma importante de la interacción de piezas y mortero. El comportamiento y los modos de falla de la mampostería ante cargas axiales dependen en forma importante de la interacción de piezas y mortero, es decir, se produce una interacción entre ambos materiales y el material menos deformable restringe las deformaciones transversales del material mas deformable introduciendo esfuerzos de compresión en el. Además, el más deformable introduce esfuerzos de tensión en el menos deformable (Tena y Miranda, 2003).

En el ensaye a compresión de pilas de mampostería el modo de falla más común es el conocido como falla por tracción lateral, es decir, a través de grietas verticales en las piezas (Figura 2.5). Para piezas de baja resistencia, la falla se presenta por aplastamiento en compresión de las piezas mismas. El aplastamiento del mortero generalmente no ocasiona la falla cuando los esfuerzos son puramente axiales.

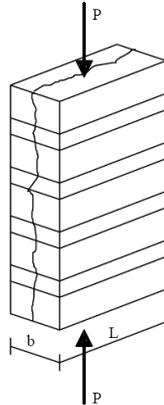


Figura 2.5. Falla típica por tracción lateral (Tena, 2001).

La resistencia a la compresión de la mampostería puede estimarse como:

$$f_m = 0.45 f_p \text{ para piezas de barro y sílico-calcáreas}$$

$$f_m = 0.60 f_p \text{ para piezas de concreto}$$

donde:

f_m es la resistencia a la compresión de la mampostería.

f_p es la resistencia a la compresión de la pieza.

2.2.-Resistencia a tensión diagonal de la mampostería.

Existen muchas situaciones en las que un muro de mampostería se puede ver sometido a tensión diagonal (sismos, asentamientos diferenciales o mala distribución de cargas gravitatorias). Para estudiar el comportamiento de la mampostería en tensión diagonal se utiliza un ensaye de compresión diagonal. Este ensaye consiste en aplicar una compresión diagonal a un murete de dimensiones aproximadamente cuadradas en las que la base sea formada por lo menos de una y media piezas (Figura 2.6). En este ensaye, en el murete 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 (Tena y Miranda, 2003).

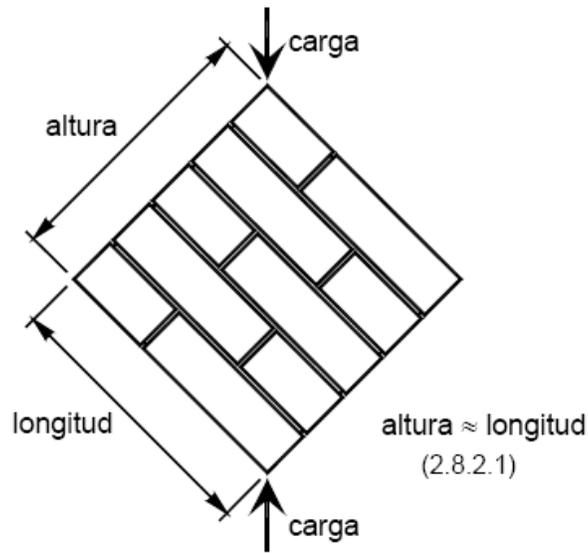
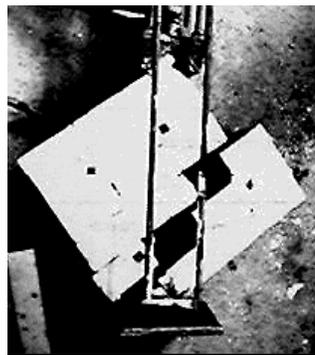


Figura 2.6. Murete para el ensaye a compresión diagonal (NTCMRCDF 2004).

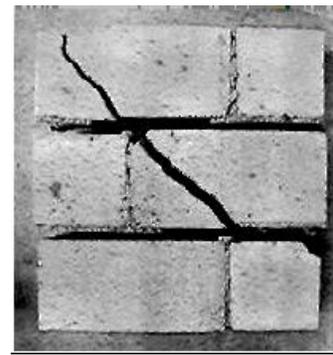
La falla de un muro por efecto de fuerzas cortantes ocurre generalmente a través de grietas inclinadas debidas a tensiones diagonales. Estas grietas se forman generalmente a lo largo de las juntas, propiciadas por la debilidad de la unión pieza-mortero. Sin embargo, para piezas con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan indistintamente piezas y mortero. El tipo de falla mixto ocurre cuando la resistencia a tensión de las piezas es semejante a la adherencia de las piezas y mortero. En la figura 2.7 se muestra los tipos de falla típicos en muretes.



a) Falla a tensión diagonal



b) Falla por las juntas



c) Falla Mixta

Figura 2.7.- Modos de falla de ensayos de compresión diagonal (Meli, 1979).

Las NTCMRCDF ofrecen valores indicativos de la resistencia a compresión diagonal para cuando no se realicen ensayos de muretes (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Valores indicativos de la resistencia a compresión diagonal (NTCMRCDF).

Pieza	Tipo de mortero	V_m^{*1} , MPa (kg/cm ²)
Tabique de barro recocido ($f_p^* \geq 6$ MPa, 60 kg/cm ²)	I	0.35 (3.5)
	II y III	0.3 (3)
Tabique de barro con huecos verticales ($f_p^* \geq 12$ MPa, 120 kg/cm ²)	I	0.3 (3)
	II y III	0.2 (2)
Bloque de concreto (pesado ²) ($f_p^* \geq 10$ MPa, 100 kg/cm ²)	I	0.35 (3.5)
	II y III	0.25 (2.5)
Tabique de concreto (tabicón) ($f_p^* \geq 10$ MPa, 100 kg/cm ²)	I	0.3 (3)
	II y III	0.2 (2)

¹ Cuando el valor de la tabla sea mayor que $0.25\sqrt{f_m^*}$, en MPa ($0.8\sqrt{f_m^*}$, en kg/cm²) se tomará este último valor como V_m^* .

² Con peso volumétrico neto, en estado seco, no menor que 20 kN/m³ (2 000 kg/m³).

3.-Clasificación de muros de mampostería según el tipo de refuerzo.

De acuerdo al tipo y cuantía de refuerzo utilizado en las edificaciones de mampostería, estas pueden clasificarse en: Mampostería no reforzada, mampostería confinada y mampostería reforzada. El refuerzo de la mampostería puede ser interior o exterior. La mampostería confinada puede también estar reforzada interior o exteriormente.

La mampostería no reforzada es aquella que en su interior o de manera adosada no cuenta con ningún tipo de acero de refuerzo, o bien se considera no reforzada aquella que aun contando con algún tipo de refuerzo interior o exterior, no tengan el refuerzo mínimo para ser consideradas reforzada (NTCMRCDF 2004), en la cual el espesor mínimo, según el reglamento debe ser de 10cm. Este tipo de mampostería por ser muy débil a los esfuerzos de tensión no debe ser utilizada en zonas de riesgo sísmico.

El tipo de mampostería más utilizado en nuestro país es la mampostería confinada. En este tipo de mampostería se colocan elementos de concreto reforzado, de sección transversal pequeña, en el perímetro de los muros. Los elementos de confinamiento horizontales se les conoce en nuestro país como dalas y a los elementos de confinamiento verticales se les denomina castillos (Figura 2.8). Es importante hacer notar que la mampostería confinada tiene un comportamiento mecánico muy diferente a la mampostería no reforzada, y que cuando los elementos confinantes tienen un número, ubicación y detallado adecuado, la mampostería confinada es un excelente material para ser usado en edificaciones para vivienda de poca altura aún en zonas de alta sismicidad (Tena y Miranda, 2003).

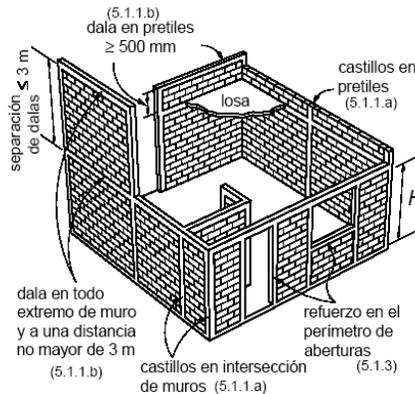
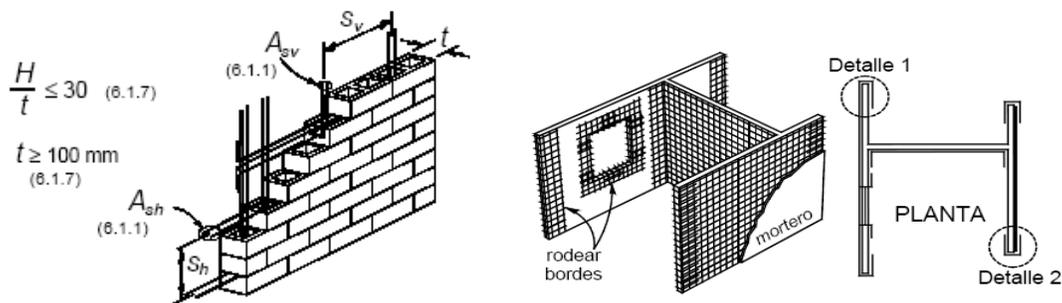


Figura 2.8. Mampostería Confinada (NTCMRCDF 2004).

La mampostería reforzada es aquella que cuenta con barras o alambres corrugados de acero, horizontales y/o verticales, colocados en las celdas de las piezas huecas, así como en las juntas de mortero. En este caso la mampostería se considera como reforzada interiormente, la cual debe de cumplir con una cuantía, separación y anclaje del acero, así como propiedades de mortero o concreto de rellano según NTCMRCDF 2004 (Figura 2.9a). También se considera mampostería reforzada aquella que cuenta acero adosado en una o ambas caras exteriores del muro, como los pueden ser mallas electro-soldadas clavadas a la mampostería o embebidas en el recubrimiento mortero (NTCMRCDF 2004). (Figura 2.9b).

El refuerzo con materiales compuestos (Ehsani y Saadatmanesh, 1996) también es un refuerzo exterior, sin embargo, en nuestro país y en América Latina, aún no se ha socializado su utilización y por lo tanto los reglamentos de construcción no tienen incluidas recomendaciones de diseño para este tipo de refuerzo. En las NTCRCDF, en el capítulo de evaluación y rehabilitación se contempla la posibilidad de utilizar encamisado de fibras plásticas adheridas con resinas cuando se desea modificar la resistencia o capacidad de deformación y se plantean únicamente, algunas recomendaciones de tipo general sobre la limpieza de las superficies y protección de los encamisados.



a) Muro Reforzado Interiormente.

b) Muro con refuerzo adosado.

Figura 2.9. Mampostería reforzada (NTCMRCDF 2004).

4.-Comportamiento de muros de mampostería

Una estructura de mampostería estará sometida durante su vida útil principalmente a los siguientes efectos: a) Carga vertical debida al peso de las losas, a la carga viva y a su peso propio, b) fuerzas cortantes y momentos flectores contenidos en su plano, originados por fuerzas sísmicas o por movimientos de la cimentación y c) empujes normales al plano de los muros que pueden ser causados por viento, tierra, agua o fuerzas sísmicas (Hernandez, 2003).

Debido a las fuerzas antes mencionadas pueden existir fallo en la mampostería, es por esto que se deben de conocer los tipos de fallas existentes en la mampostería, independientemente si son reforzadas o no.

La falla por carga axial puede ocurrir cuando son piezas de muy mala calidad o cuando han perdido su capacidad de carga debido a fuerzas gravitacionales. Este tipo de falla se caracteriza por grietas verticales cuando es material de buena calidad o por aplastamiento cuando son de mala calidad. Es raro que una estructura presente falla por carga axial debido a la gran área de los muros.

La falla por flexión se presenta si es alcanzada la resistencia a tensión de la mampostería. Este tipo de falla se caracteriza por grietas horizontales en el extremo del muro que está sujeto a tensión, siendo de mayor longitud en la parte inferior y van decreciendo conforme a la altura. Este tipo de falla es poco probable que se presente debido a que la carga axial en el muro contrarresta los momentos actuantes en el muro o por el acero de refuerzo colocado en los extremos (Figura 2.10 c).

La falla más frecuente es la debida a fuerzas cortantes o tensión diagonal producidas por fuerzas laterales en el plano o por hundimientos diferenciales del terreno. Esta falla se caracteriza por grietas diagonales en el muro las cuales pueden formarse a lo largo de las juntas del mortero (falla por cortante) o sobre piezas y juntas (falla por tensión diagonal). La falla por tensión diagonal se presenta cuando la mampostería alcanza su resistencia a tensión (Figura 2.10b).

La falla de cortante por deslizamiento es consecuencia de un nivel bajo de carga vertical y refuerzo débil. La carga lateral es transferida por la fricción entre las superficies a lo largo de la grieta (trabazón del agregado) y por la acción de dovela del refuerzo vertical (resistencia perpendicular al eje de la barra). (Figura 2.10a)

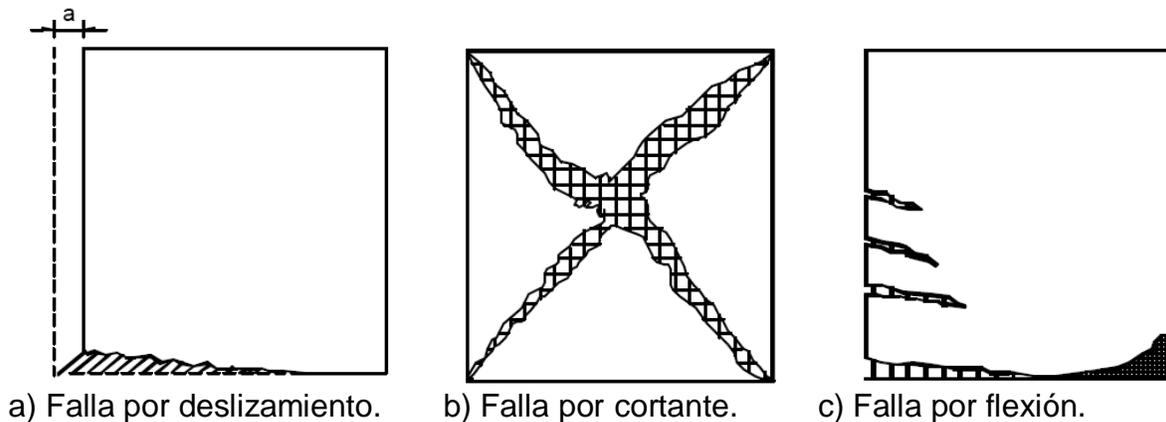


Figura 2.10. Modos típicos de falla en muros de mampostería sujetos a cargas laterales (Pineda y Alcocer, 2004).

5.-Estudios anteriores realizados a muros de mampostería

Una de las principales necesidades del ser humano desde sus orígenes, ha sido el contar con un lugar en donde vivir, proteger a su familia y a sus bienes, y en donde se establezca el núcleo de la unión y la convivencia familiar. El tipo de vivienda ha evolucionado con la humanidad desde las cavernas hasta las actuales construcciones modulares y prefabricadas. El tipo de material usado ha dependido de los que abundan en la zona y de la tradición constructora de cada cultura. En el México actual se construye a base de concreto, acero y mampostería, principalmente. Esta última es de gran importancia en nuestro país ya que representa el tipo de construcción más usado en la vivienda popular. Por sus características, las viviendas de mampostería son las más sencillas de realizar y más económicas que las fabricadas con otros materiales. Debido a esto, la mampostería es usada tanto por la gente que autoconstruye sus casas como en la construcción de edificios multifamiliares financiados por organismos públicos y privados. (Flores y Alcocer, 2001).

Para poder determinar el comportamiento de la mampostería es necesario realizar pruebas de muros de mampostería a escala natural con las variables que afectan dicho comportamiento, dichas variables pueden ser los elementos de refuerzo y la presencia de huecos (puertas y ventanas).

Uno de los primeros experimentos realizados en México fueron los realizados por R. Meli, quien publicó los resultados de una serie de ensayos en muros de mampostería con diversas variantes (Meli, 1975). En estos estudios pioneros se estableció gran parte del conocimiento aún vigente sobre mampostería en México. Sus conclusiones y recomendaciones sirvieron de fundamento para el desarrollo de las NTC para Estructuras de Mampostería (DDF, 1989).

Meli señala que mientras no ocurran agrietamientos importantes por flexión o por tensión diagonal, el comportamiento de los muros, independientemente del tipo de refuerzo, es aproximadamente elástico lineal. Después del agrietamiento inclinado, el comportamiento se caracteriza por una disminución paulatina de la rigidez y la resistencia, tanto mayor cuanto más grande es la deformación máxima alcanzada en el ciclo. Las cargas de agrietamiento y máxima se alcanzaron para distorsiones con valores cercanos a 0.001 y 0.003, respectivamente.

Para cargas monótonas, propuso un comportamiento idealizado mediante una relación trilineal. En ella, el primer tramo describe el comportamiento hasta el agrietamiento inclinado; el segundo tramo corresponde a la zona entre el agrietamiento y la carga máxima, y finalmente sigue un tramo horizontal hasta la falla. Esta curva se define con cinco parámetros; de éstos, la carga de agrietamiento y la rigidez inicial se pueden predecir teóricamente, mientras que los otros tres parámetros se obtienen a partir de datos experimentales.

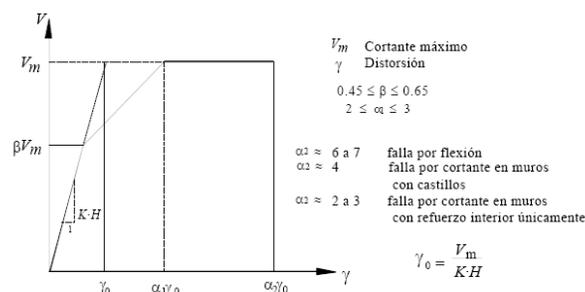


Figura 2.11. Modelo trilineal para cargas monótonas en muros de mampostería (Meli, 1975).

Conviene aclarar que lo desarrollado por R. Meli fue para muros aislados ensayados en voladizo o a tensión diagonal. Se supone, implícitamente, que sus conclusiones y modelos se pueden extrapolar a estructuras con muros de varios pisos y acoplados por sistemas de piso y parapetos.

(Meli, 1994; Alcocer, 1994, Díaz- Infante, 1993), tuvieron como objetivo verificar experimentalmente la seguridad sísmica de estructuras de mampostería diseñadas y construidas según el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, evaluar el efecto de distintas alternativas de refuerzo en el comportamiento de muros de mampostería confinada, proponer, si es necesario, modificaciones a las prácticas de diseño y construcción de estructuras de mampostería que conduzcan a construcciones más seguras y eficientes, y valorar el desempeño de nuevos materiales y sistemas constructivos.

En una primera etapa (Alcocer, 1994a), evaluó el efecto del grado de acoplamiento a flexión en el comportamiento de muros de mampostería confinada, para lo cual ensayo tres muros de mampostería confinada a escala natural formados, cada uno, por dos muros colineales. La variable de estudio fue el grado de acoplamiento entre los muros, entendiéndose por esto la manera en que estaban ligados misma que se refleja en la forma de la abertura entre ellos.

Los tres especímenes estaban constituidos por dos muros de 2.40 m de altura, uno de ellos de 2.40 m de longitud y el otro de 1.60 m (con relaciones de aspecto iguales a 1 y 1.5, respectivamente). En el primer modelo, W-W, los muros estaban conectados por medio de barras corrugadas de acero de alta resistencia que transmitían la fuerza lateral entre ellos. En el segundo modelo, WBW, los muros estaban ligados por una dala y una losa de concreto colados en sitio, creando una abertura en forma de puerta. El tercer espécimen, WWW, tuvo un grado de acoplamiento mayor, ya que contó con pretilas, de manera que la abertura tenía forma de ventana.

Entre sus principales conclusiones estaban: 1) El modo de falla fue dominado por deformaciones al corte de los muros y no fue modificado por el

grado de acoplamiento, 2) Independientemente del grado de acoplamiento, las fuerzas cortantes de entrepiso correspondientes al agrietamiento diagonal fueron semejantes en los tres modelos, 3) Las tres estructuras alcanzaron cortantes máximos semejantes independientemente del grado de acoplamiento, 4) Aunque la rigidez inicial estuvo influenciada por la forma de la abertura, la tendencia en la degradación de rigidez durante la prueba fue similar para todos los modelos.

En una segunda etapa se evaluó el efecto de diferentes tipos de refuerzo horizontal (Alcocer, 1994b), se ensayaron dos especímenes de mampostería confinada con dimensiones idénticas a las del modelo WBW de la primera fase, el cual se tomó como modelo de control. La variable estudiada en estos modelos fue el tipo y la cuantía del refuerzo horizontal en los muros.

En el espécimen WBW-E se usó escalerilla como refuerzo horizontal. La escalerilla es una armadura prefabricada de alambre. La escalerilla empleada estaba formada por dos alambres calibre número 10 de alta resistencia, estirados en frío y unidos mediante alambres transversales soldados a los longitudinales y espaciados a cada 40 cm. El esfuerzo nominal de fluencia es $f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$. Este refuerzo se colocó a cada dos hiladas de modo que la cuantía de acero fue igual a $p_h = 0.106 \%$ y el producto de ésta por el esfuerzo de fluencia fue $p_h f_y = 5.3 \text{ kg/cm}^2$. La cuantía empleada fue superior a la mínima requerida por las NTC (DDF,1989). Según esta referencia, para muros con cuantías horizontales iguales o superiores a la mínima se acepta incrementar la resistencia a fuerza cortante en un 25%. La escalerilla se colocó en una sola pieza (sin traslape) y se ancló con ganchos a 180° alrededor del refuerzo longitudinal de los castillos.

El segundo espécimen probado, WBW-B, fue reforzado con dos alambres corrugados de alta resistencia colocados a cada tres hiladas de tabique. El diámetro nominal de los alambres fue de $5/32$ pulg (3.97 mm). La cuantía de acero horizontal fue igual a 0.00094, la cual fue superior al valor mínimo señalado en las NTC. Al igual que en el modelo anterior, los alambres horizontales se anclaron alrededor del refuerzo longitudinal de los castillos con ganchos a 180° . El esfuerzo

nominal de fluencia para los alambres corrugados fue de 6000 kg/cm² ($p_h = 0.094$ %, $p_h f_y = 5.66$ kg/cm²).

Las conclusiones más sobresalientes fueron: a) El uso de la escalerilla como refuerzo horizontal no modificó el modo de falla; las deformaciones al corte gobernaron la respuesta de la estructura, b) El refuerzo horizontal con alambres corrugados de alta resistencia logró una distribución más uniforme del daño en los tableros de mampostería. La resistencia fue 69% superior a la del modelo sin refuerzo horizontal, c) Aunque la resistencia del modelo con alambres corrugados aumentó con respecto a la estructura de control sin refuerzo, la capacidad de deformación no se incrementó. Por tanto, este tipo de refuerzo puede usarse si la distorsión máxima a la que estará sujeta la estructura no es mayor de 0.005, d) La cantidad y tipo de refuerzo horizontal no afectaron la rigidez inicial de los modelos. La tendencia en la degradación de rigidez fue similar para todos los modelos.

En una fase cinco se ensayaron cuatro muros aislados con diferentes cuantías de refuerzo horizontal, se tuvo como objeto estudiar la contribución del acero horizontal a la resistencia y a la capacidad de deformación de la mampostería, así como evaluar el efecto de distintas cuantías de acero transversal en los extremos de los castillos y la facilidad de construcción de las distintas soluciones estudiadas (Aguilar, 1994).

Las dimensiones de los muros eran de 2.5 x 2.5 m, el primer modelo, M-3/8-Z6, se reforzó horizontalmente con una varilla de 3/8 pulg de diámetro con esfuerzo nominal de fluencia de 4200 kg/cm², a cada cuatro hiladas de tabique. Lo anterior nos da una cuantía de refuerzo horizontal $p_h = 0.2$ %, por lo que el producto de la cuantía de refuerzo por el esfuerzo de fluencia es $p_h f_y = 8.40$ kg/cm². Este espécimen presentó una buena distribución del agrietamiento hasta que se generó el mecanismo de falla debido a una combinación de flexión y de cortante en los castillos. La falla se presentó por deslizamiento en forma horizontal a lo largo de una hilada, y el desconchamiento de los castillos hasta dicha altura.

El modelo M-0-E6 fue el modelo de control, sin refuerzo horizontal. Su falla fue típica por tensión diagonal-cortante caracterizada por grietas inclinadas en forma de X. El mecanismo de colapso se formó al penetrar las grietas inclinadas en los extremos de los castillos.

En el espécimen M-5/32-E20 se colocaron dos alambres corrugados de 5/32" (3.97 mm) a cada cuatro hiladas. Se usó acero de alta resistencia estirado en frío con esfuerzo nominal de fluencia $f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$ ($\rho_h = 0.071 \%$, $\rho_h f_y = 4.26 \text{ kg/cm}^2$). La cuantía del refuerzo horizontal fue superior a la mínima que señala el RDF (DDF, 1989) para poder incrementar la resistencia en un 25% sobre la nominal para muros sin refuerzo.

El último espécimen de la fase, M-1/4-E6, fue reforzado horizontalmente con dos alambres corrugados de 1/4 pulg (6.3 mm), de alta resistencia estirados en frío con $f_y = 6000 \text{ kg/cm}^2$ ($\rho_h = 0.180 \%$, $\rho_h f_y = 10.8 \text{ kg/cm}^2$). Este modelo presentó una gran capacidad de deformación, alcanzando distorsiones máximas de 1.7%. El modo de falla fue semejante al del modelo M-3/8-Z6 debido a compresión-cortante. Este tipo de fallas se deben a elevadas cuantías de refuerzo horizontal.

Entre sus principales conclusiones destaca: 1) La presencia del refuerzo horizontal da lugar a un daño uniforme, y aumenta la capacidad de deformación y la resistencia ante cargas laterales, 2) Los valores del cortante de agrietamiento y la distorsión a la que se presentan fueron similares en todos los casos, 3) Existe una relación directa entre la cuantía de acero horizontal y la distorsión a la que se presenta el cortante máximo y 4) La rigidez inicial de los modelos no se modificó por la presencia de refuerzo horizontal.

Tena et al. (2007) ensayaron dos muros de mampostería combinada y confinada ante cargas cíclicas. Los ensayos se realizaron conforme al protocolo para ensayos cíclicos establecido en las NTCMRCDF 2004. Se valoran tanto los mecanismos resistentes, como las características de deformación de esta

modalidad de mampostería, definiendo parámetros útiles para fines de análisis y diseño.

Las dimensiones de los muros fueron de 2.30 x 2.30 m. su nomenclatura fue MCC-1 y MCC-2 de acuerdo al orden de ensaye. En la figura 2.12 se muestra la configuración de ambos muros.

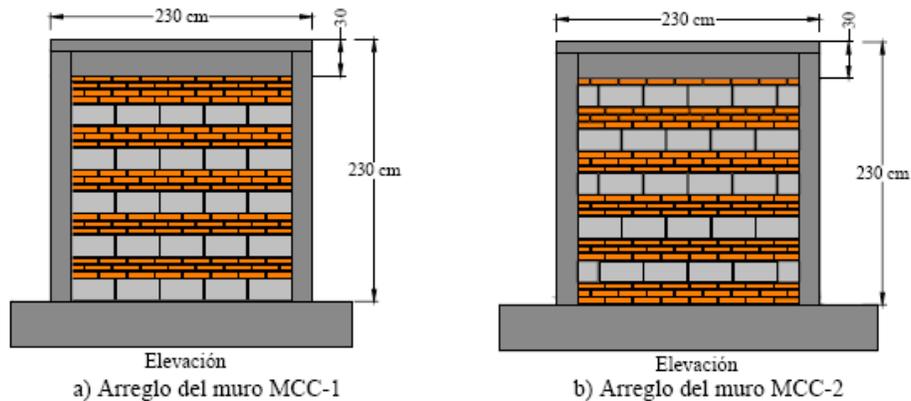


Figura 2.12. Arreglo de los muros de mampostería combinada y confinada (Tena et al., 2007).

De los resultados experimentales se concluye que esta modalidad de mampostería, es apta para resistir cargas laterales por sismo, si se emplea mortero tipo I en su pega y se confina conforme a los lineamientos de las normas de referencia.

Además se han realizado el estudio de muros de mampostería con la presencia de huecos (puertas y ventanas), las cuales sin duda alguna afectan el comportamiento de dichas estructuras, (Flores et al., 2004) realizó el estudio experimental de dos muros de mampostería a escala natural, de piezas macizas de arcilla, sometidos a cargas horizontales cíclicas reversibles. Las dimensiones de ambos muros fueron 3 m de largo por 2.5 m de alto y contaron en el centro con una abertura en forma de ventana. El modelo de control no tenía refuerzo alrededor de la abertura, mientras que el segundo modelo se confinó la abertura con castillos y dalas de concreto reforzado. Los resultados de los ensayos mostraron que, ambos especímenes se agrietaron con la misma carga lateral, y

que el modelo sin refuerzo en la abertura tuvo mayor deterioro y su resistencia cayó rápidamente después de una distorsión de 0.005, mientras que el modelo con castillos y dalas en la ventana llegó a mayor resistencia y mantuvo la carga más allá de una distorsión de 0.008.

También, J. Velásquez y B. Quiñones (2010), presentan los resultados de dos muros de mampostería confinada a escala natural, con abertura en el centro, contruidos con piezas de block y mortero tipo III. Uno de los muros se e reforzó en el perímetro de la ventana mientras que el otro se dejó sin refuerzo. Los muros ensayados se sujetaron carga axial constante y carga lateral cíclica reversible en su plano. La distorsión de agrietamiento fue la misma para los dos muros, sin embargo, el muro reforzado en la ventana presentó un patrón de agrietamiento distribuido y de ancho menor que el correspondiente al muro sin refuerzo. Además éste exhibió una resistencia última 1.56 veces mayor que la del correspondiente sin refuerzo.

Maximiliano Astroza I. et al. (2005) realizaron el estudio experimental de 12 muros de mampostería confinada a escala natural con y sin abertura en el paño de los muros, contruidos con unidades cerámicas del tipo rejilla con huecos. Las aberturas simulan la situación que se presenta por la presencia de una ventana centrada y de una abertura puerta-ventana. El refuerzo de la abertura consistió en una barra vertical de 10 mm de diámetro, ubicada en los huecos de las unidades vecinas a la abertura, y una escalerilla electro-soldada ubicada en la junta de mortero bajo la ventana. Los muros se ensayaron en voladizo sin carga vertical, aplicando una carga horizontal en forma cíclica hasta alcanzar una distorsión angular o deriva igual a un 1.33%. De los resultados se comprueba un efecto de la posición y del tamaño de las aberturas en la respuesta del muro, produciéndose en algunos casos una asimetría del comportamiento.

Se han realizado investigaciones a muros de concreto que contaban con puesta o ventanas. Se ensayaron 19 muros de concreto a escala natural del tipo usado en vivienda, con altura de 2.5 m y espesor de 10 cm, con longitudes de 1.24, 2.4 y 5.4 m, dos de ellos con aberturas para puerta y ventana. Los concretos

usados fueron de 15 MPa (150 kg/cm²). Se reforzaron con la cuantía mínima de acero y con la mitad de ésta, mediante barras corrugadas o malla de alambre soldado. Se ensayaron aplicando carga horizontal cíclica reversible a nivel de la losa. El modo de falla consistió en agrietamientos inclinados a 45° en ambas direcciones con la fractura de los alambres de malla. Se presentan resultados de resistencia y capacidad de deformación inelástica, comportamiento histerético, degradación de rigidez y participación del refuerzo (Flores et al., 2007).

También se han realizado ensayos a las diferentes técnicas de refuerzo, (Flores et al., 1999) presentan los resultados del programa experimental desarrollado para estudiar el comportamiento sísmico de estructuras de marcos de concreto y muros de mampostería de bloque reforzados con malla electro-soldada y recubrimiento de concreto. Este es el tipo de estructura y una de las técnicas de rehabilitación comúnmente usadas en centrales telefónicas.

El proyecto se dividió en dos partes. En la primera se construyeron y ensayaron 15 muretes de 80 cm de lado a los que se les ancló una malla electro-soldada. El ensaye consistió en la aplicación de fuerza cortante en el plano de la malla sobre los anclajes que la sujetaban a la mampostería. Las variantes fueron el tipo de anclaje utilizado, y la presencia o ausencia de recubrimiento de concreto. Con la información obtenida se diseñó el ensaye de cuatro modelos marco-muro diafragma que fueron sometidos a fuerzas horizontales cíclicas alternadas. El primer modelo fue de control, y representó una estructura original marco-muro diafragma sin recubrimiento; los tres restantes fueron reforzados con una malla electro-soldada en una cara y un recubrimiento de concreto de 9 cm de espesor. La variable fue el tipo y distribución de los anclajes.

Se concluyó que, debido a la alta adherencia entre recubrimiento y el muro diafragma de mampostería, no es necesario colocar conectores en la mampostería. Sin embargo, es fundamental el diseño cuidadoso de los que se ubiquen en los elementos del marco de concreto. La falla inició al aplastarse el muro diafragma de mampostería, lo que provocó una redistribución de esfuerzos cortantes entre el recubrimiento y la estructura original. Esto a su vez, incrementó

las demandas de corte sobre los conectores colocados en la viga y columnas del marco de concreto hasta alcanzar su capacidad de carga. Finalmente esta conexión falló, dando lugar a una brusca caída de la capacidad resistente de los modelos.

Pineda et al. (2004) verificó experimentalmente la factibilidad del uso del encamisado de muros de mampostería (malla de alambre soldado con recubrimiento de mortero) como técnica de rehabilitación. Se construyeron y ensayaron cuatro especímenes a escala natural ante fuerzas laterales cíclicas alternadas, uno de concreto y tres de mampostería confinada de tabique macizo de arcilla con encamisado. Las variables de estudio fueron el calibre de los alambres de la malla y los conectores para fijar a la misma al muro. Se comparó el comportamiento con el de un muro de mampostería confinada sin refuerzo en el panel, usado como espécimen de control. Los resultados indican que la técnica del encamisado con el uso de malla de alambre soldado con recubrimiento de concreto fue efectiva para mejorar las características sismorresistentes de la mampostería confinada. En todos los especímenes rehabilitados con el encamisado se observó un patrón de agrietamiento más uniforme y un notorio incremento en la rigidez y resistencia comparado con el del espécimen de control.

Campbell et al. (2005) realizó ensayos cíclicos de muros de albañilería armada a escala real dañados y luego reparados mediante dos técnicas: engrapado de las grietas con corchetes y el refuerzo con doble malla de acero y mortero. Los muros (4 probetas de albañilería armada de 2.52 m. de altura, 1.67 de longitud y 14 cm. de espesor) previamente se llevaron al colapso mediante aplicación de carga horizontal cíclica hasta su total pérdida de rigidez. Posteriormente se repararon mediante las técnicas indicadas: 2 muros se engraparon las grietas con corchetes de acero y 2 muros se reforzaron mediante doble malla de acero y aplicación de mortero proyectado (shotcrete) y se sometieron nuevamente a ensayos mediante aplicación de carga horizontal cíclica hasta su colapso. Se muestran los ciclos de histéresis de los muros reparados

para distintos niveles de desplazamientos y se comparan con los correspondientes ciclos de histéresis de los muros originales.

Moreno et al. (2009) realizaron muretes los cuales fueron reforzados con diferentes cuantías de acero en las juntas de mortero, su objetivo en esta investigación era el 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. Donde concluyo, que existe un aumento notable de la resistencia de muretes reforzados respecto a los no reforzados, dicho aumento en la resistencia esta directamente relacionado con la ubicación del refuerzo, y que la ubicación del refuerzo horizontal en el muro influye en el recorrido descrito por la línea de falla.

Así mismo ha existido ensayos empleado Polímeros Fibro-Reforzados (FRP) como (Tumialan et al., 2004), quienes investigaron el reforzamiento de la mampostería utilizando varillas de GFRP, para esto construyeron 4 especímenes, a escala natural, tres muros bordeados por pórticos de concreto armado y un pórtico, fueron sometidos a cargas sísmicas coplanares y perpendiculares al plano. El tabique del espécimen IM1 no fue reforzado. El tabique del espécimen IM2 fue reforzado con varillas de fibra de vidrio de 1/4" de diámetro que terminaban a 10 cm de la cara interior de las columnas, estas varillas estuvieron espaciadas a 20 cm (en cada junta horizontal). El reforzamiento del tabique del espécimen IM3 fue similar al de IM2, con la diferencia que las varillas anclaban en las columnas. El pórtico sin tabique fue ensayado para determinar su rigidez y resistencia para comparar sus cambios con la presencia de mampostería. El ensaye consistió en tres etapas, la primera etapa consistió en carga cíclica lateral hasta alcanzar una distorsión del 0.7%, en la segunda etapa los especímenes fueron colocados en una mesa vibratoria, con acciones perpendiculares al plano, para la tercer etapa se aplico carga lateral monotónica hasta llegar al colapso de los especímenes. Los investigadores concluyeron que: 1) Los especímenes reforzados con varillas de fibra de vidrio pueden alcanzar distorsiones de 0.7% sin

perder su capacidad resistente a carga lateral. Para este nivel de distorsión, la resistencia de los tabiques reforzados fue 50% mayor que la del no reforzado, asimismo, la degradación de rigidez lateral de los muros reforzados no implica degradación de resistencia, 2) Los tabiques reforzados con varillas de fibra de vidrio tuvieron una mayor cantidad de fisuras que el tabique no reforzado, pero estas fisuras fueron mas finas, 3) 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.

Loaiza en el 2008, utilizo varillas de GFRP para la reparación de un muro de mampostería previamente dañado con cargas cíclicas en el plano. Las dimensiones del muro fueron 2.40 x 2.40 x 0.13m, y no se colocó ningún refuerzo horizontal, considerándose únicamente mechas de acero de 6mm cada 3 hiladas para conectar la albañilería con las columnas, El muro se ensayó a carga lateral cíclica controlándose el desplazamiento horizontal en 10 fases subdivididas a su vez en distintos ciclos un desplazamiento de 20.0 mm. Luego de haber sido ensayado el muro y de presentar falla por corte, se procedió a repararlo para tratar de recuperar su rigidez inicial y su capacidad máxima resistente. La reparación consistió en varillas de GFRP de ¼” colocadas cada dos hiladas de manera alternada, en ambas caras del muro y recubiertas con mortero 1:4. También, se reparo la base de los castillos y se resanaron las grietas principales del castillo y de la mampostería. Se obtuvo como conclusiones producto de esta investigación que: la técnica de reparación implementada no fue lo suficientemente efectiva en lograr recuperar la rigidez inicial y la resistencia al agrietamiento diagonal. La rigidez lateral inicial y la resistencia al agrietamiento diagonal recuperada en el muro reparado fue el 73% y el 56% del muro original, respectivamente. La técnica de reparación hizo que se recupere más de 6 veces la rigidez con la que terminó el muro original luego del ensayo de carga lateral al que fue sometido. La capacidad de carga lateral máxima del muro pudo recuperarse mediante esta sencilla técnica de reparación. Se puede apreciar a simple vista en el muro, que las fisuras diagonales fueron de menor grosor en el muro reparado que en el muro original.

Velázquez y Quiñónez (2007), investigaron la aportación de la resistencia a tensión diagonal que diferentes cantidades de refuerzo de GFRP le proporcionan a la mampostería de barro recocido, y el desempeño de dicho material como elemento de refuerzo o de rehabilitación en muros de mampostería confinados. En una primera etapa construyeron 9 muretes de 1.2 x 1.2m, 5 de los cuales fueron ensayados a compresión diagonal y 2 de estos rehabilitados con tiras de GFRP y re-ensayados. Los otros 4 fueron reforzados con diferentes cuantías de GFRP. En la segunda etapa se construyeron dos muros de mampostería confinados a escala natural, uno de ellos reforzado exteriormente con tiras de GFRP. Ambos muros ensayados con carga monotónica. Como conclusión de esta investigación se obtuvo que: 1) La carga en el límite proporcional de los muretes reforzados y ensayados en compresión diagonal se incrementa entre un 15% y 153%, su resistencia a tensión diagonal entre 39% y 248% y su ductilidad entre 235% y 297%. La carga del muro confinado y reforzado ensayado en voladizo se incrementa 54%, la carga de agrietamiento 86% y su resistencia 183%. 2) EL refuerzo de GFRP contribuye a la resistencia tensión diagonal y por lo tanto a la resistencia a carga lateral en muros de mampostería desde el inicio de la aplicación de carga. 3) La rigidez del muro reforzado tiene una menor degradación de la rigidez. 4) La contribución de las deformaciones por flexión en el muro reforzado es mayor que la contribución por flexión del muro no reforzado, lo que implica que el refuerzo puede inducir la falla por flexión. 5) El material compuesto puede ser utilizado para el refuerzo de muros de mampostería o para la rehabilitación de estas.

Tumialan et al. (2000) reforzaron con varillas de GFRP muros de block sujetos a flexión y a compresión diagonal, los muros sujetos a flexión se reforzaron con varillas #3 de GFRP, El espécimen R1 fue reforzado con una varilla de GFRP, el segundo espécimen R2 con 2 varillas de GFRP y en el tercer espécimen L1 se reforzó con una lamina 3" de GRFP con el fin de comparar la aportación de estas con la de las varillas. La capacidad de carga de los muros sin reforzar fue estimada en 800 lbs. Los muros sujetos a compresión diagonal se reforzaron con varillas #2 de GFRP, uno de los muros R0 fue utilizado como muro

control, el muro R2 reforzado con varillas de GFRP en todas las juntas horizontales, el muro L2 se reforzó con 4 tiras horizontales de 4", equivalente al refuerzo del muro R2 en términos de resistencia. Se concluyó que: Los muros de mampostería reforzados con varillas de GFRP mostraron un comportamiento similar a los muros reforzados con laminas de GFRP. Para el refuerzo a flexión se puede lograr un incremento entre 4 y 14 veces la capacidad original de la mampostería. Incrementos notables en la capacidad a cortante se logran reforzando los muros mediante GFRP.

EIGawady et al. (2007) construyó cuatro muros de mampostería a mediana escala con unidades de arcilla huecas, tres de los muros se ensayaron con carga lateral cíclica sin refuerzo alguno para después ser reparados con mallas de FRP. El cuarto muro fue reforzado desde un comienzo. Todos los especímenes se reforzaron en toda la superficie de un solo lado y ensayados bajo carga lateral constante y carga lateral cíclica. El parámetro clave fue la cantidad de FRP colocado. El refuerzo o rehabilitación de un solo lado aumento significativamente la resistencia lateral, la rigidez y la disipación de energía, dicho aumento era proporcional al aumento de la cantidad de refuerzo de FRP. Sin embargo el uso de una gran cantidad de FRP llevo a la falla frágil.

Para validar la resistencia a compresión diagonal de muretes reforzados con varillas de GFRP y de fibras basálticas (FB) (Araiza et al., 2008), construyeron 10 muretes con dimensiones aproximadas de 0.55m x 0.55m. Cuatro de los diez muretes se reforzaron en una cara con una sola varilla de GFRP, tres mas fueron reforzados con varillas de fibra basáltica de igual manera. Los tres muretes restantes fueron utilizados como muretes de referencia y uno de ellos rehabilitado después de su ensaye. La varilla fue adherirá con resina epóxica en dirección opuesta al eje de aplicación de la carga, no se ranuró el muro con la intención de no ocasionar agrietamientos prematuros. La carga se aplicó de forma monótonica en 2 muretes no reforzados, a cinco reforzados y al rehabilitado, en los tres restantes se aplicaron ciclos de carga y descarga (uno para cada tipo de varilla). Como conclusión de esta investigación se llego a que la resistencia y la

deformación a tensión y a flexión de la varilla, además, del adhesivo utilizado resultaron ser adecuados para el reforzamiento y rehabilitación de los muretes. Esto debido a que en la cara reforzada de los muretes se presentó agrietamientos pequeños. Además, se percibe que al retirar la carga, el agrietamiento al centro del murete se cierra. Este efecto se debe a que la varilla de polímero fibro-reforzado se recupera por no sobrepasar su resistencia y deformación última, este efecto es importante para soportar cargas cíclicas como los eventos sísmicos.

Bajpai y Duthinh (2003) realizaron pruebas de adherencia entre varillas de FRP y la mampostería, el método de ensaye consistió en primas de mampostería separados 405mm y unidos mediante dos varillas de FRP. Para la aplicación de la carga se colocó un gato hidráulico y una celda de carga. Los prismas consistieron en dos piezas de mampostería unidas mediante mortero. Entre las variantes de esta investigación fueron el diámetro de las varillas utilizadas y el tipo de adhesivo. Para la colocación de las varillas se ranuró la junta de mortero dejando un hueco de sección transversal cuadrada y con profundidad del doble de la varilla a embeber. En uno de los prismas la varilla de FRP se embebió a lo largo de toda la junta de mortero mientras que en el otro solo 185mm.

Con el anclaje total asegurada, los investigadores utilizaron las varillas de FRP para reforzar muros de mampostería sujetos a fuerzas fuera del plano. Los especímenes eran reforzados paralelo o perpendicular a las juntas de mortero. Se construyeron 4 especímenes de dimensiones 2.85 x 0.40 x 0.20m (dos para cada tipo de refuerzo) y 4 mas de 2.85 x 0.80 x 0.20m reforzadas de igual manera. De estas investigaciones se concluyó que el adhesivo epoxico reforzado con fibras de vidrio cortas permite el desarrollo que las varillas de 6.5 mm de diámetro 185mm o menos de la mitad de una pieza de block y que este epoxico debe de ser efectivo con otro tipo de barras. Una vez asegurado el anclaje las barras de FRP unidas externamente proporcionan un método eficiente para reforzar la mampostería sujeta a fuerzas fuera del plano.

Se han investigado diferentes tipos de anclaje innovadores para utilizarlos en polímeros fibro-reforzados (Lun et al., 2012). Para esto construyeron 12

especímenes de mampostería, los cuales contaban en sus extremos vigas de concreto reforzado, que simulaban, los elementos de soporte de un edificio típico. Los especímenes fueron cargados fuera de plano usando una bolsa de aire para aplicar presión uniformemente distribuida a la mampostería. Entre los materiales de refuerzo se utilizaron vidrio (GFRP), carbón (CFRP), PET (polietileno tereftalato). Los tipos de anclaje investigados fueron, la superposición, la placa de acero, envolver alrededor de un barra de CFRP embebida, anclajes de fibras de CFRP, barras de CFRP de cortante y sistemas continuos de en las superficie de CFRP. Los resultados experimentales indican que el tipo de anclaje del FRP tuvo un efecto significativo en el modo de fallo, ductilidad y capacidad de carga. Fortalecimiento de los muros conducen a un aumento importante de la capacidad de carga que van desde 1.6 hasta 7.2 veces la capacidad del muro no reforzado.

Por otro lado Turco et al., (2006) reportan los resultados de mampostería sujeta a esfuerzos de flexión y cortante, reforzados con FRP de forma circular y rectangular. Otra de las variantes fue el adhesivo utilizado (pasta epóxica y látex modificado con cemento). Para evaluar la resistencia a flexión se construyeron 20 muros (3 con tabiques y 17 con block de concreto) de dimensiones de 1.22 x 0.61 m. El refuerzo fue externo utilizando barras circulares de 6.35mm y 9.53mm o barras rectangulares de 2x15mm y 2x16mm, ambas de fibras de carbono (CFRP). La resistencia a cortante se determino mediante 6 muros de mampostería de block con dimensiones nominales de 1.60 x 1.60m. Las barras utilizadas fueron barras lisas y barras recubiertas de arena de 5mm y 6mm de diámetro respectivamente. Entre otra de las variantes estaba: la colocación de barras colocadas en todas las juntas de una sola cara, en barras colocadas cada dos juntas en una y ambas caras. Los autores concluyeron que la fuerza y la pseudo-ductilidad se pueden aumentar sustancialmente, la capacidad se incrementó hasta 2.5 en el caso de refuerzo a cortante y por 4.5 a 26 veces en el caso de refuerzo a la flexión. Las barras de GFRP han demostrado ser un buen material para el fortalecimiento de la mampostería, a menudo los resultados fueron mejores que los del CFRP. Las barras lisas circulares son apropiadas en el refuerzo a cortante y las barras rectangulares en el refuerzo a flexión.

Griffith et al. (2012) ensayaron 15 muros de mampostería de barro para evaluar el rendimiento de refuerzo exterior mediante tiras de CFRP, las variables incluían: carga cíclica, pre-compresión axial, el espaciamiento entre las tiras y el porcentaje de refuerzo. También se evaluó esta misma técnica para ser utilizada como método de rehabilitación. Las tiras fueron colocadas a lo largo de la altura del muro. Los resultados de estos experimentos indican que: la carga cíclica reversible y pre-compresión axial tienen poco efecto en las curvas de respuesta carga-deflexión, la separación de las tiras de FRP y la cantidad de estas influyen en la respuesta del muro y que para una mismo porcentaje de refuerzo, tiras pequeñas con menor separación presentan mejores resultados.

Li et al. (2007) desarrollaron un modelo analítico para predecir la eficiencia de los polímeros fibro-reforzados en el reforzamiento muros de mampostería y así reducir el daño sísmico. La técnica de refuerzo consistió en barras de FRP colocadas de manera adosada. El modelo fue calibrado con 12 muros de mampostería de block de dimensiones nominales de 1.62 x 1.62 m sujetos a compresión diagonal. Los resultados experimentales demostraron la eficiencia del refuerzo de FRP en la mejora del comportamiento estructural de los muros. El modelo analítico, que estima la capacidad a cortante de muros reforzados con diferentes técnicas, mostro una compatibilidad razonable con los resultados experimentales.

III. PROGRAMA EXPERIMENTAL

En este capítulo se explica con detalle el programa experimental desarrollado. Se describen los especímenes y el proceso constructivo. También se presentan las propiedades de los materiales empleados, el sistema de carga, la ubicación de la instrumentación, el procedimiento de ensaye y la captura de datos son igualmente descritos.

El objetivo de esta investigación es determinar el incremento en la resistencia ante cargas laterales en muros de mampostería de block confinados al ser reforzados con varillas de GFRP en las juntas horizontales de mortero, colocadas sobre ambas caras del muro cubriendo especialmente las diagonales principales de este.

Para lograr este objetivo se construyeron dos muros de mampostería de block confinados a escala natural, uno de los muros no fue reforzado en las juntas de mortero, para ser utilizado como muro patrón. El segundo muro se reforzó con varillas de GFRP en las juntas de mortero cubriendo 0.50 m. a cada lado de las diagonales principales. Las dimensiones de dichos muros corresponden a las utilizadas en las casas habitación de interés social de uno o dos niveles.

Ambos especímenes fueron construidos según la práctica vigente en la ciudad de Culiacán y cumpliendo las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Distrito Federal (NTCMRCDF 2004). Los muros fueron sujetos a carga vertical constante y a fuerza lateral cíclica según el protocolo de carga recomendado por las NTCMRCDF 2004. El comparar los resultados obtenidos demuestra el mejoramiento en el comportamiento de muros de mampostería sujetos a carga lateral reforzados con varillas de GFRP.

1.-Descripción de los Especímenes

Se construyeron dos muros de 3.30m x 2.50m x 0.12m incluidas las dimensiones de los castillos y dalas (Figura 3.1). La altura establecida representa el valor típico de la altura de entrepiso en edificaciones de vivienda de interés social. Para su construcción se utilizaron piezas de block hueco con dimensiones 0.12m x 0.20m x 0.40m, el elemento de unión entre las piezas fue mortero cemento-arena. La nomenclatura utilizada para el muro sin refuerzo fue M1-SR, M2-CR para el muro reforzado con varillas de GFRP.

Para el confinamiento de los muros se utilizaron castillos, dala y una losa de carga de concreto reforzado. Las dimensiones de los castillos fueron 0.12 x 0.15 m. reforzados con 4 varillas No. 3 (3/8" de diámetro) y estribos de alambón de No.2 (1/4" de diámetro) espaciado a cada 18 cm. Los primeros tres estribos de la parte inferior y superior de cada castillo fueron colocados a cada 9 cm. según las recomendaciones de las NTCMRCDF 2004. Las dimensiones de la dala fue 0.15m x 0.12m reforzada con 4 varillas No. 3 (3/8" de diámetro) y estribos de alambón de No.2 (1/4" de diámetro) espaciado a cada 18 cm. Al igual que en los castillos los estribos en los extremos fueron colocados a cada 9 cm. La losa fue de 0.10m x 0.50m reforzada en los extremos con varillas No. 3, uniéndose a la dala con bastones de varilla No. 3 colocados a cada 19 cm. (Figura 3.2). En la figura 3.3 se muestran unas imágenes del armado de castillos, dalas y losa de carga.

El refuerzo del muro M2-CR consistió en varillas de GFRP de diámetro de 3/8" colocadas en todas las juntas horizontales de mortero cubriendo 0.50 m. de cada lado de las diagonales del muro, de modo que alcanzaron una longitud de 1m y adheridas mediante resina epóxica Sikadur-31 HMG. El refuerzo con las varillas de GFRP fue por ambas caras del muro (Figura 3.4).

Los muros se desplantaron sobre vigas de cimentación de concreto reforzados de 3.60m x 0.95m x 0.30m, las cuales fueron construidas en el sitio de ensaye y ancladas en la losa de reacción por barras de 1 de pulgada, colocadas a cada 0.75m.

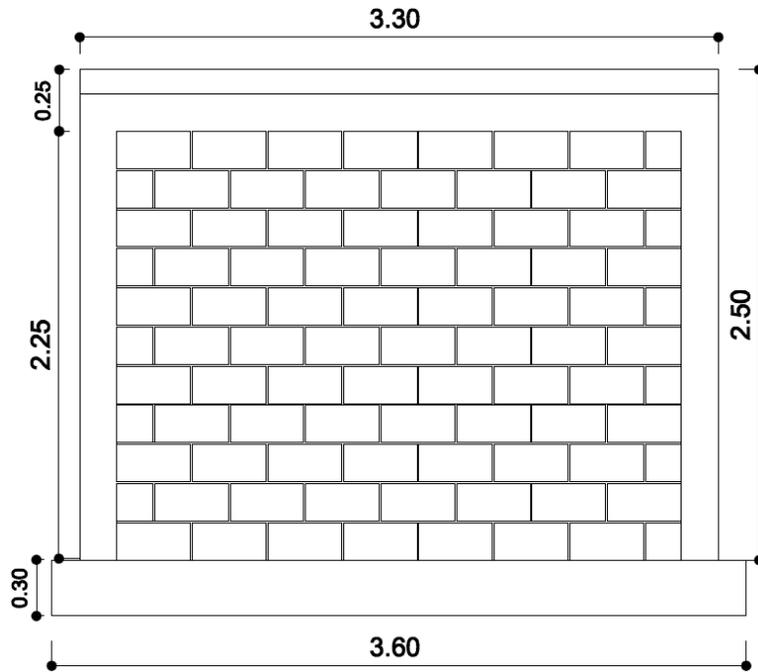


Figura 3.1 Geometría y dimensiones (en metros) de los especímenes.

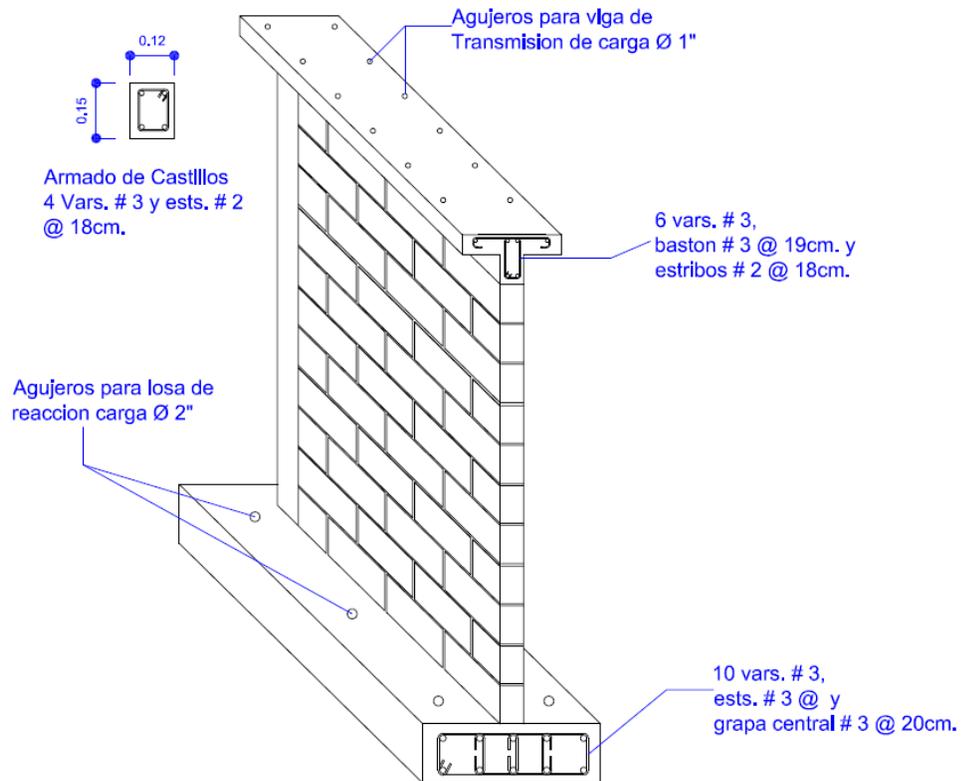


Figura 3.2 Esquema de armado de los elementos confinantes.

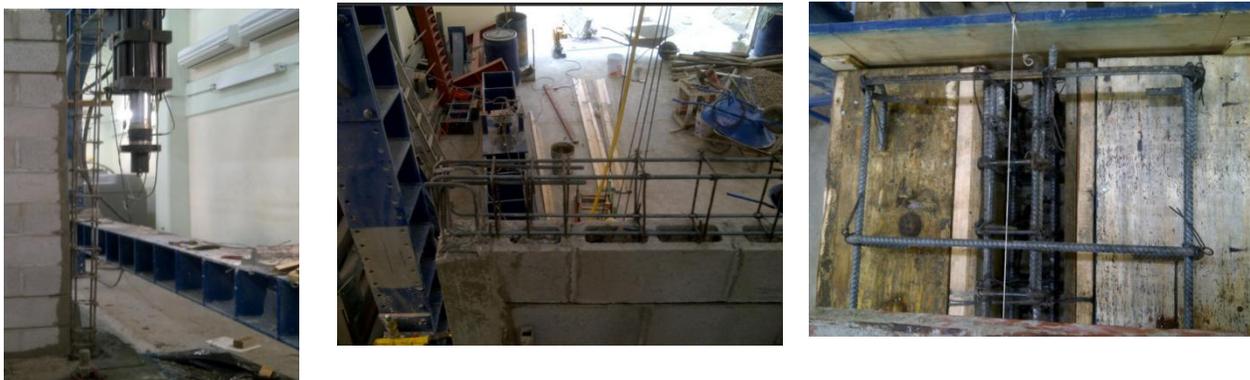


Figura 3.3 Armado de castillos, dala y losa de carga.

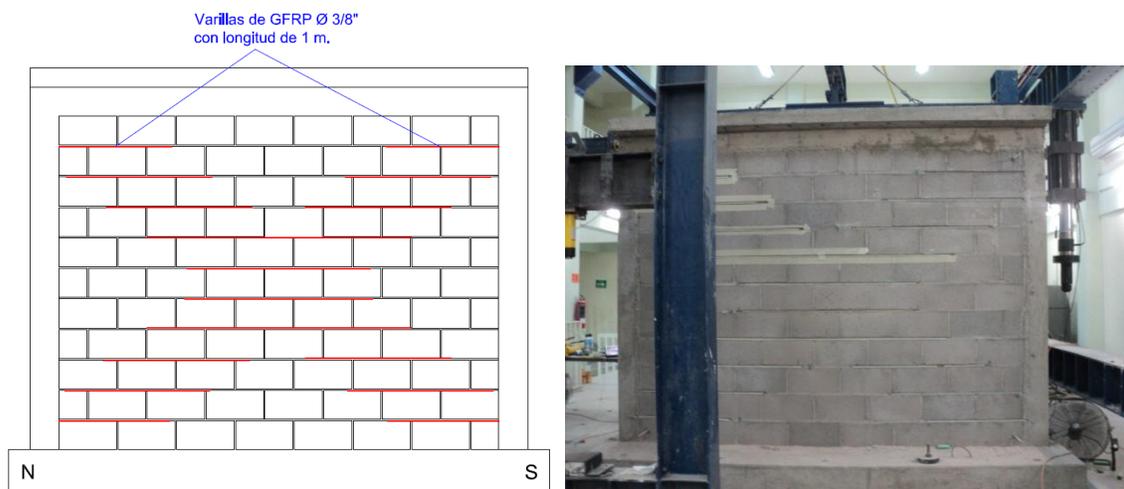


Figura 3.4 Esquema de refuerzo con varillas de GFRP del muro M2-CR.

2.-Materiales

Todos los materiales empleados en la construcción de los especímenes fueron muestreados con objeto de determinar sus propiedades mecánicas.

2.1.-Piezas de Block

Los muros fueron construidos con block hueco de concreto con dimensiones nominales 12cm x 20cm x 40cm, a las piezas de block individuales se les determinó la resistencia a compresión, el peso volumétrico, la absorción inicial y la absorción total de acuerdo a las normas correspondientes NMX-C-

ONNCCE (Figura 3.5a). En la tabla 3.1 se muestran los valores de los parámetros obtenidos y la norma aplicada.

Tabla 3.1 Propiedades físicas y mecánicas de las piezas.

PROPIEDAD	VALOR PROMEDIO.	CV	NORMA
Dimensiones (lxbxh) (cm)	39.72x11.81x19.48	0.007	NMX-C-038-ONNCCE
Peso volumétrico (kg/m ³)	1192.28	0.017	NMX-C-404-ONNCCE
Absorción inicial. (gr/min)			NMX-C-307-ONNCCE
Absorción total (%)	7.45	0.09	NMX-C-037-ONNCCE
Resistencia a compresión. (F _p)(kg/cm ²)	78.29	0.129	NMX-C-036-ONNCCE

2.2.-Propiedades de la Mampostería

La resistencia a compresión de la mampostería y su módulo de elasticidad, se determinaron de acuerdo a la norma NMX-C-464-ONNCCE, mediante pilas de piezas elaboradas al mismo tiempo que la construcción de los muros, se construyeron cinco pilas, de tres piezas cada una, Los tabiques extremos de las pilas se cabecearon con azufre antes de ser ensayadas para garantizar una superficie de carga plana y horizontalmente nivelada. La resistencia a la compresión promedio de la mampostería fue $f_m = 5.65\text{Mpa}$. (57.60 kg/cm²kg/cm²) y su módulo de elasticidad $E=5851.6\text{ Mpa}$. (59669.2 kg/cm²).

La resistencia a tensión diagonal de la mampostería se obtuvo según la norma NMX-C-464-ONNCCE de cinco muretes aproximadamente cuadrados formados por block y medio, y 3 hiladas de altura, construidos en forma simultánea a la construcción de los muros. La resistencia a la compresión diagonal promedio

fue $v_m = 0.63 \text{ Mpa}$ (6.46 kg/cm^2) y el módulo de cortante $G = 1249.15 \text{ Mpa}$ (12737.83 kg/cm^2) (Figura 3.5b).

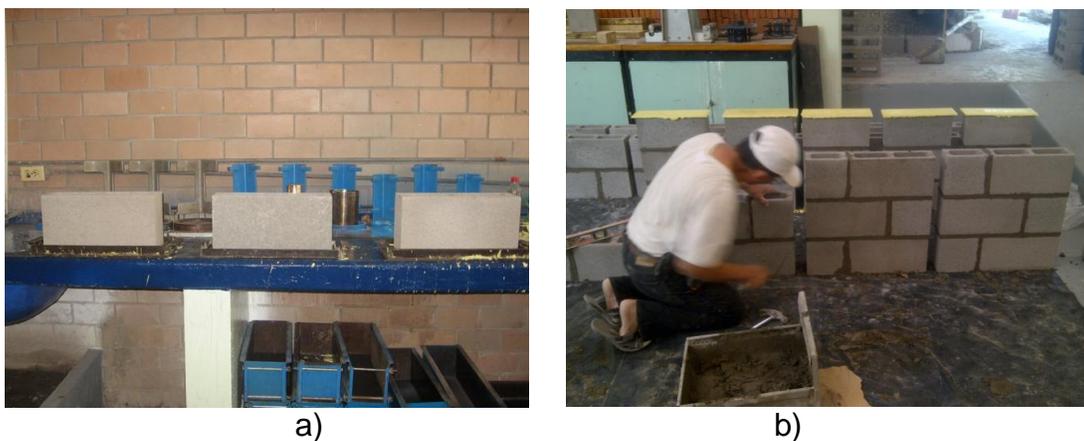


Figura 3.5 Piezas, pilas y muretes para la determinación de las propiedades mecánicas de la mampostería.

2.3.-Concreto

El concreto para los elementos confinantes fue elaborado en el laboratorio con cemento portland, con una dosificación por volumen para una resistencia de diseño de 19.61 Mpa (200 kg/cm^2) con un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ " (Figura 3.6a).

Para las vigas de cimentación se utilizó concreto premezclado con una resistencia de diseño de 34.32 Mpa (350 kg/cm^2), se tomaron cuatro muestras para determinar su resistencia.

2.4.-Mortero

El elemento de unión de las piezas de block fue mortero cemento-arena Tipo I. El mortero se proporcionó con una relación volumétrica cemento:arena de 1:2.5, empleando cemento portland. Tal como sucede en la práctica tradicional no se estableció ninguna recomendación sobre la cantidad de agua. La resistencia a compresión del mortero se obtuvo mediante el ensaye de nueve series de tres cubos de $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$. obtenidos de cada batida de mortero que se realizó para la construcción de muros, muretes y pilas, es decir, se elaboraron veintisiete cubos (Figura 3.6b). Las muestras fueron elaboradas y ensayadas según la norma

NMX-C-061. La resistencia a la compresión promedio del mortero utilizado en el muro M2-CR fue de 15.58 Mpa (158.83 kg/cm²) y la del muro M1-SR fue 15.97 Mpa (162.81 kg/cm²). Se estima que la diferencia en los valores de la resistencia a la compresión del mortero puede deberse a diferencia en la cantidad de agua de mezclado utilizada.



a)



b)

Figura 3.6 Cilindros de concreto y cubos de mortero para la determinación de la resistencia a compresión del concreto y mortero utilizados en los muros confinados.

2.5.-Acero de Refuerzo

Para el refuerzo longitudinal de las vigas de cimentación, de los castillos, de las dalas y de la losa de carga se usaron varillas corrugadas numero tres con esfuerzo nominal de fluencia $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ (412.0 Mpa). Para los estribos de castillos y dalas se uso alambrión liso del número dos con $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ (248.2 Mpa) y para los estribos de la losa de cimentación y losa de carga, varilla corrugada número tres con $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ (412.0 Mpa).

2.6.-Adhesivo epóxico comercial marca Sikadur 31 Hi-Mod Gel

Se utilizó adhesivo epóxico comercial marca Sikadur 31 Hi-Mod Gel para la fijación de las varillas de GFRP en el muro M2-CR. El adhesivo se eligió de acuerdo a las recomendaciones de uso del fabricante, los cuales reportan que es utilizado en el anclaje de varillas de acero, pegado de piezas de resinas poliéster o

epóxicas. Algunas de las propiedades mecánicas mas importantes que reporta el fabricantes son: Resistencia a la tensión, 78.45 MPa (800 kg/cm²); Modulo elástico, 4216.86 MPa (43 000 kg/cm²); Adherencia al concreto, 3.5 MPa (35 kg/cm²), Adherencia al acero, 14.71 MPa (150 kg/cm²), Deformación a la rotura, 1.3% (Figura 3.7).



Figura 3.7 Sikadur 31 HMG, utilizado para la fijación de las Varillas de GFRP.

2.7.-Varillas de Polímero Fibro-Reforzado con Fibra de Vidrio (GFRP)

Para el refuerzo del muro M2-CR se utilizaron varillas de GFRP de diámetro exterior promedio de 0.9 cm, fabricadas por el método de Pultrusión, con un contenido de fibra del 49 % en volumen. Se obtuvieron muestras de 60 cm. para determinar su resistencia a tensión y modulo de elasticidad los cuales resultaron de 836 MPa (8 203 kg/cm²) y 35.2 GPa (358 940 kg/cm²) respectivamente (Figura 3.8).



Figura 3.8 Varillas de GFRP.

3.-Construcción de los Especímenes

El proceso seguido durante la construcción de los especímenes fue consistente con la práctica actual. En este proyecto se reutilizaron las vigas de cimentación de concreto reforzado con dimensiones 3.6 m x 0.95 m x 0.30 m en las cuales se desplantaron los muros. Las vigas se elaboraron con concreto premezclado con una resistencia de diseño de 350kg/cm^2 , para el refuerzo longitudinal se utilizaron varillas No. 4 en el lecho superior e inferior de la viga y transversalmente con estribos y una grapa central de varilla corrugada No. 3 a cada 20 cm.

Para poder anclar los castillos se dejó sin colar en cada extremo de éstas un hueco de 20cm x 20cm x 30 cm. Como en este proyecto se reutilizaron las losas de cimentación fue necesario demoler el concreto de los huecos para posteriormente anclar los castillos de confinamiento de los muros. Las losas contaban con tubos de PVC de 1 ½" de diámetro por 0.40m de largo, para el anclaje de las vigas de cimentación a la losa de reacción. En la Figura 3.9 se muestran algunas etapas de la construcción de las vigas.



Figura 3.9 Construcción de las vigas de cimentación.

Las vigas de cimentación fueron alineadas respecto al muro de reacción para asegurar que el eje del muro de mampostería fuera perpendicular a este (Figura 3.10).



Figura 3.10 Alineación de la losas de Cimentación.

Ya con las vigas de cimentación alineadas, se prosiguió a construir los muros confinados, de 3.30m x 2.50m x 0.12m, considerando las dimensiones de dalas y castillo. Las piezas de block utilizadas fueron de 12x20x40cm, mismas que fueron unidas con mortero 1:2.5, siguiendo las práctica constructiva de la región y realizados por un albañil y un peón dedicados a la construcción de edificaciones con muros de mampostería. En la Figura 3.11 se muestran algunas etapas de la construcción.

Los muros se construyeron en tres etapas, en la primera parte se colocaron la hiladas correspondientes a cada muro hasta alcanzar la altura total de los especímenes, aproximadamente 2.50m. Para el muro M2-CR se ranuraron las boquillas donde se colocaron las varillas de GFRP a una profundidad aproximada de 1 cm. Utilizando una tabla con un clavo que sobresalía 1 cm.

En la segunda etapa se armaron y colaron castillos de cada uno de los muros hasta la altura de la mampostería. En la tercera parte se armaron y colaron monóticamente dalas y losas de carga de ambos muros. No se tomó ninguna consideración especial para el curado de castillos, dalas y losas de carga. Las varillas longitudinales de castillos y dalas fueron terminadas en los nudos con dobleces a 90° con una longitud mayor a 12 veces el diámetro de la varilla, los estribos de castillos y dalas fueron terminados en el nudo con dobleces a 135°, la esquina con el dobléz fue alternada de modo que los dobleces no coincidieran entre sí, para evitar la formación de un plano débil. Los primeros 3 estribos de los extremos de los castillos y dalas fueron colocados a la mitad de la separación normal entre ellos de acuerdo a las recomendaciones de las NTCRCDF. Los muros fueron pintados de blanco y cuadriculados a cada 30cm con tinta negra para facilitar el registro del patrón de agrietamiento durante el ensaye.

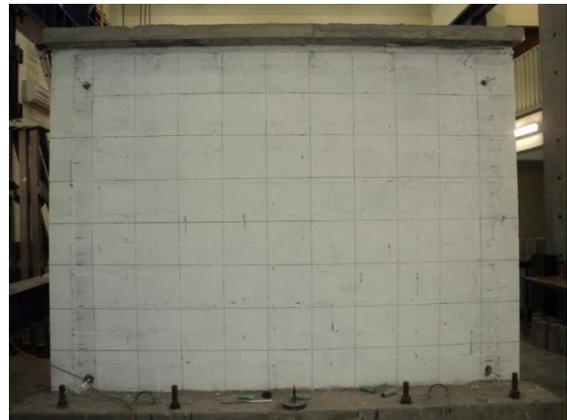


Figura 3.11 Etapas de la construcción de los muros.

4.-Refuerzo

La técnica de refuerzo tensión diagonal del muro M2-CR consistió en varillas de GFRP en las juntas horizontales de mortero cubriendo 0.50 m de cada lado de las diagonales principales de ambas caras del muro, adheridas con una capa de resina epóxica Sikadur-31HMG. El muro contaba con 11 hiladas, lo que nos daba un total de 10 juntas, de modo que el refuerzo en la 4 juntas centrales consistió en una sola varilla de 1.20 m para las juntas internas y 1.8 m para las externas. Como el muro fue ranurado donde se colocarían las varillas en su etapa de construcción, se procedió a definir aun mejor dicha área con un esmeril angular de 4 1/2", posteriormente se limpio la ranura con aire comprimido para después delimitar el área con cinta masking para una mejor aplicación de la resina.

Para la instalación de las varillas de GFRP primeramente se colocó una cama de la resina epóxica por medio de una espátula para posteriormente embeber la varilla. La varilla no contó con ningún soporte dentro de la ranura, solo se requirió que reposara un la cama de resina epóxica. Una vez instalada la varilla se procedió a recubrirla con la misma resina epóxica (Figura 3.12).



a) Ranurado.



b) Detallado del área a reforzar



c) Limpieza de la ranura.



b) Delimitado del área de refuerzo.



d) Colocación de la primer capa de Sikadur 31 HMG.



e) Varilla de GFRP embebida.



f) Recubriendo la Varilla de GFRP.



g) Muro Reforzado.

Figura 3.12 Etapas del Refuerzo del muro M2-CR.

5.-Instrumentación

La instrumentación fue colocada en puntos considerados relevantes con el objeto de estudiar el comportamiento local y global de la estructura. Se usaron tres tipos de instrumentos: celdas de carga, transductores de desplazamiento y deformímetros eléctricos (strain-gages).

Dependiendo del tipo de instrumentación y su ubicación nos permitió recabar información sobre la carga aplicada por los gatos, el desplazamiento lateral de la losa, la deformación de la mampostería, el deslizamiento del muro entre la viga de cimentación, así como de la viga de cimentación respecto a la losa de reacción. También se pudo conocer las deformaciones del acero, un perfil de los muros durante su ensaye y detectar movimientos fuera del plano de estos.

Con el fin de conocer el desplazamiento en ciertas áreas del muro se colocaron transductores de desplazamiento en puntos estratégicos, en total se utilizaron 15: 2 diagonales, 2 verticales, 2 horizontales, 3 para conocer el desplazamiento en la parte superior del muro, 2 para generar el perfil del muro, 1 para medir el desplazamiento relativo de la losa de reacción respecto a la viga de cimentación, 1 para medir el desplazamiento de la losa de cimentación respecto al muro, así como 2 perpendiculares al muro para detectar movimientos fuera del plano de este (Figura 3.13).

Además de los micrómetros se colocó un strain-gages en una varilla en la parte inferior de cada castillo a 2.5 cm. a partir de la losa de cimentación (EA), se decidió en este punto debido a que ahí se genera la mayor concentración de esfuerzos. Las áreas de colocación de los strain-gages fueron preparadas, eliminando corrugaciones e imperfecciones en el acero, posteriormente se procedió al pegado y protección del dispositivo como lo indica el fabricante (Figura 3.14).

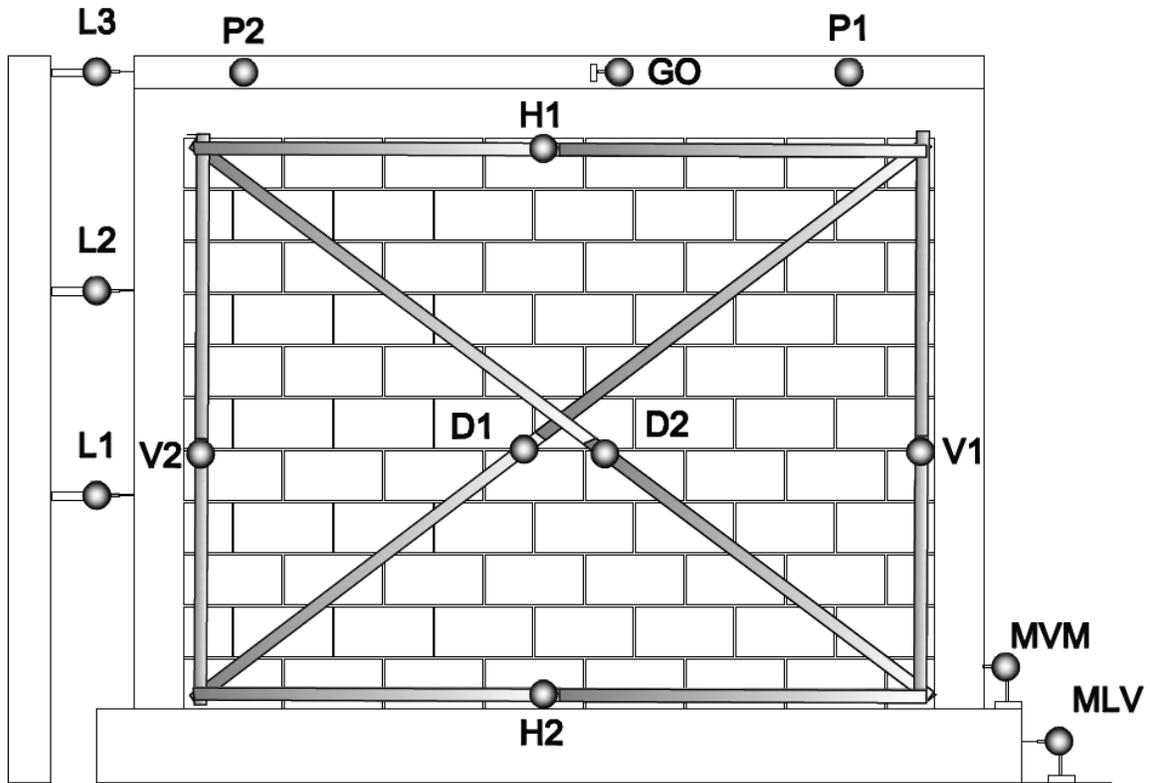


Figura 3.13 Instrumentación utilizada en los especímenes.

En la Figura 3.15, se muestra un esquema de la colocación de los strain-gages del acero.



Figura 3.14 Instrumentación del acero en los castillos.

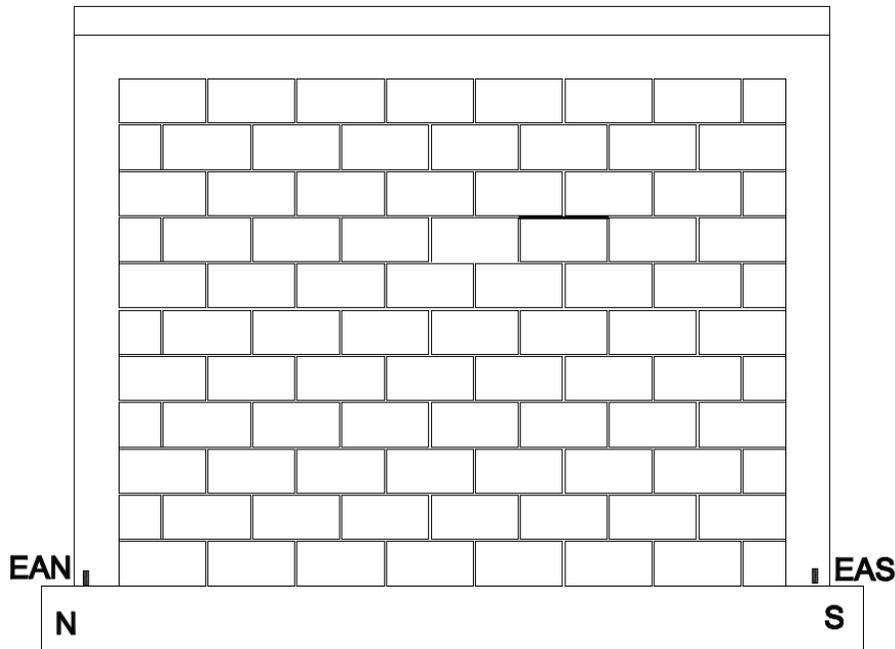


Figura 3.15. Ubicación de los deformímetros eléctricos del Acero.

6.-Descripción del Ensayo

La etapa experimental se realizó en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa debido a que en dicha universidad se cuenta con la infraestructura y equipo necesario para la realización de las pruebas, esto se logró gracias al convenio de cooperación entre ambas universidades y al programa de movilidad académica.

Para la realización del ensayo la viga de cimentación se fijó a la losa de reacción mediante pernos de acero A 36 de 1 ¼” de diámetro. Los muros fueron ensayados en voladizo. Se les aplicó carga vertical constante por medio de una viga cajón diseñada especialmente para la aplicación de la carga, la cual se construyó con placas de acero de 1” con dimensiones de largo, ancho y alto de 4m x 0.50m x 0.60m respectivamente. A la viga cajón se le colocaron atezadores a cada 60cm en la parte interior con la intención de rigidizarla y lograr una distribución uniforme de la carga vertical. La carga vertical se aplicó con un sistema de tensores sujetos de la parte superior del muro a la losa de reacción,

estos sometidos a tensión a través de un gato colocado en la parte superior de la viga, el cual se acciona con una bomba manual. Se controló la carga con un manómetro y con un extensómetro colocado en cada tensor.

La misma viga de carga con un peso aproximado de 1600 kg. se utilizó para aplicar la carga cíclica reversible, mediante un gato de doble acción de 30 toneladas anclado al muro de reacción mediante un sistema doblemente articulado para asegurar la aplicación de carga lateral sin flexión en el plano del muro. La viga de carga se fijó con tornillos de 3/4" a cada 25 cm en la losa de carga en la parte superior de cada uno de los muros para lograr una eficiente distribución de la carga lateral. El control del gato se realizó con una bomba manual. En la Figura 3.16 se muestra un esquema detallado del sistema de carga utilizado.

La carga cíclica fue aplicada mediante una historia de ciclos de carga y ciclos de distorsión, como lo recomienda las NTCMRCDF 2004 en su apéndice (A.7). De esta manera, se aplicaron seis ciclos de carga, los primeros dos fueron hasta el 25% de la carga de agrietamiento estimada, los siguientes dos fueron hasta un 50% de esa misma carga, y los últimos dos hasta llegar a al primer agrietamiento. Se continuó con ciclos de distorsión con incrementos de 0.002, con sus respectivos ciclos repetidos hasta llegar a una distorsión en 0.004 en piezas huecas como lo indican las NTCMRCDF 2004 (Figura 3.17).

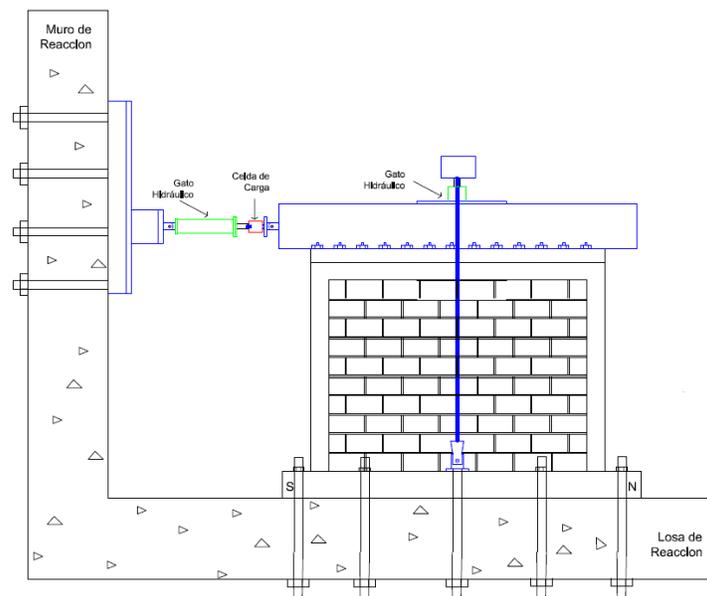
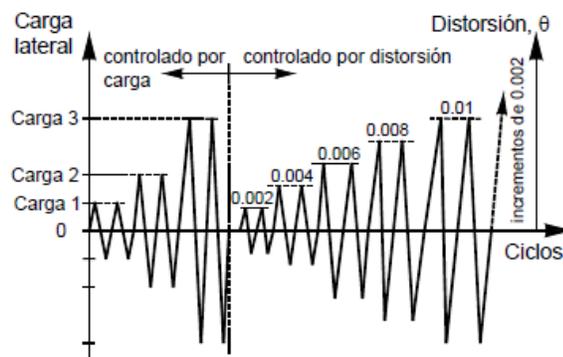




Figura 3.16 Sistema de carga utilizado para el ensaye de los muros.



Carga 1 = 0.25 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia
 Carga 2 = 0.5 veces la carga calculada de agrietamiento o fluencia
 Carga 3 = carga de agrietamiento o primera fluencia (experimental)

Figura 3.17 Historia de carga recomendada por las NTCMRCDF 2004.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se describe el comportamiento de los especímenes mediante el análisis de los patrones de agrietamiento y el estudio de las curvas de histéresis.

También se presentan, los resultados en términos de fuerza cortante de agrietamiento, fuerza cortante máxima, esfuerzo cortante de agrietamiento, distorsión al agrietamiento, distorsión máxima, deformación angular, deformación del acero de refuerzo. En los siguientes apartados se indica la forma en que se obtuvieron algunos de los parámetros.

1.- Definición de Parámetros

El comportamiento de estructuras sujetas a acciones sísmicas normalmente se estudia mediante los valores y las tendencias de distintos parámetros que relacionan sus propiedades geométricas, mecánicas y estructurales. A continuación se presentan las definiciones de algunos de estos parámetros.

Distorsión y Curva de Histéresis:

La distorsión R es el cociente entre el desplazamiento lateral del muro y la altura a la que se aplica esta carga. Usualmente se le indica en porcentaje ya que se trata de un parámetro adimensional. La curva de histéresis es la representación gráfica de la relación entre la carga lateral y la distorsión que provoca. En estas curvas es común expresar la deformación en términos de distorsión.

— 1

El desplazamiento lateral Δ_T del muro ante cargas laterales se puede atribuir al efecto de los siguientes parámetros: el cortante, la flexión y el movimiento de cuerpo rígido ocasionado por el desplazamiento del muro respecto a la viga de cimentación o de la viga respecto a la losa de reacción. De acuerdo

con lo anterior, el desplazamiento lateral total, Δ_T se puede dividir en tres componentes como sigue:

.....2

Donde: Δ_f es el desplazamiento lateral provocado por flexión.

Δ_c es el desplazamiento lateral provocado por cortante.

Δ_{CR} es el desplazamiento de cuerpo rígido del muro.

Entonces, la distorsión total del muro R, es la suma de la distorsión por flexión R_f , la distorsión por cortante R_c y la relación entre el desplazamiento de cuerpo rígido y la altura del muro:

.....3

Donde: — — —

La distorsión por movimiento de cuerpo rígido se puede calcular a partir de la medición del desplazamiento en la base del muro.

La distorsión por cortante, es la deformación angular γ del muro y puede ser calculada a partir de la medición de las deformaciones lineales de las diagonales del muro con la expresión:

$$\gamma = |\delta_1| \frac{L_1}{2Lh} + |\delta_2| \frac{L_2}{2Lh} \dots\dots\dots 4$$

Donde:

γ es la deformación angular del muro.

δ_1 es la deformación medida en la diagonal 1.

δ_2 es la deformación medida en la diagonal 2.

L_1 es la longitud inicial de la diagonal 1.

L_2 es la longitud inicial de la diagonal 2.

L es la longitud del muro h es la altura del muro.

Con el objeto de medir las deformaciones δ_1 y δ_2 se colocó en cada diagonal, un sistema de barras deslizables formado por dos barras de sección circular de modo que la barra de diámetro mas pequeño se deslizaba libremente dentro de la otra. El extremo de cada barra se articuló en las esquinas opuestas de la diagonal. Sobre la sección circular de mayor diámetro se fijó un micrómetro y sobre la sección mas pequeña se fijó una placa rectangular de modo que el vástago del micrómetro tocara dicha placa, así el desplazamiento que el micrómetro registraba era el desplazamiento de una barra respecto a la otra y por lo tanto la deformación de la diagonal (Figura 4.1).



Figura 4.1. Detalle de barras diagonales.

El modo de falla de los muros sujetos a cargas laterales depende del grado de contribución de las deformaciones por cortante y por flexión. Entonces, si durante el experimento se miden el desplazamiento lateral total del muro Δ_T , las deformaciones de las diagonales y el desplazamiento de cuerpo rígido Δ_{CR} , es posible, utilizando la Ecuación 3, determinar la contribución de la flexión a las deformaciones. La distorsión calculada con la Ecuación 1, incluye deformaciones elásticas e inelásticas.

Envoltentes de Respuesta:

Las envoltentes de respuesta son curvas construidas a partir de la respuesta carga lateral-distorsión de los especímenes que resultan de gran utilidad para comparar el comportamiento de estos. Dichas envoltentes se construyeron a partir de los valores máximos de la fuerza cortante en ciclos con su distorsión correspondiente.

2.- Muro Confinado sin refuerzo

El muro M1-SR representa un muro de mampostería confinado típico, sin refuerzo horizontal, sus dimensiones nominales fueron 3.30m x 2.50m y fue confinado con castillos y una dala superior de dimensiones nominales 0.12m x 0.15 m. Los elementos de confinamiento fueron reforzados en el sentido longitudinal con 4 varillas No. 3 y en el sentido transversal con estribos de alambra espaciados a cada 18 cm. En la parte superior del muro se le coló junto con la dala una losa de dimensiones 3.30m, 0.50m y 0.10m (largo, ancho y alto), y sobre ésta se montó el dispositivo de carga tanto vertical como lateral. Para lograr lo anterior, se colocaron tubos de PVC durante su colado, que permitieron la colocación de los pernos de sujeción del sistema de carga (Figura 4.2).



Figura 4.2. Muro M1-SR antes del proceso de carga.

La resistencia cortante obtenida del ensayo de muretes fue de 0.63 Mpa (6.46 kg/cm²). El concreto utilizado en los castillos y en la dala fue elaborado en el laboratorio con una resistencia de diseño de 19.61Mpa (200 kg/cm²).

El ensayo del espécimen, se realizó de acuerdo al protocolo de carga descrito en el Capítulo III y consistió en 3 etapas: la primer etapa en la aplicación de la carga vertical (7000 kg), la segunda en la aplicación de dos ciclos de carga lateral correspondiente al 25% de la carga de agrietamiento esperada (3722 kg), dos ciclos para el 50% (7445 Kg), dos ciclos mas a la carga de agrietamiento (14890 Kg). La tercera etapa consistió en, dos ciclos para una distorsión R=0.002, dos mas de distorsión R=0.004 y dos últimos ciclos de distorsión R=0.006. La

culminación del ensaye se debió a que el daño ocasionado al muro era considerable y a que su capacidad de carga había descendido más del 38%. En la Figura 4.3 se muestra la historia de carga al muro.

Durante el ensaye se llevó un registro del agrietamiento para diferentes niveles de carga, al mismo tiempo que sobre el muro se fueron señalando dichas grietas, colocándoles marcas en forma secuencial por ciclos según se fueron presentando. El señalamiento de grietas se hizo en ambas caras del muro. La distribución de grietas independientemente del nivel de distorsión fue semejante para ambas caras del muro.

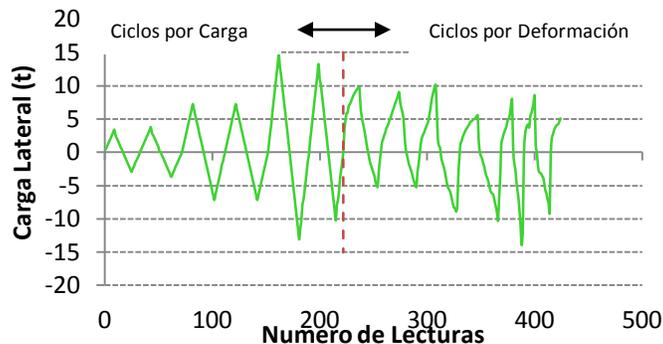


Figura 4.3. Historia de carga del Espécimen M1-SR.

Para los primeros tres ciclos no se registro daño en el muro. El primer daño se apreció en el ciclo 4 positivo cuando surgió la primer grieta por flexión en la parte baja del muro del lado Sur a 40 cm por encima de su base, esto para una carga $V=5393.4$ kg. y una distorsión $R= 0.0002$, posteriormente esta grieta continuo su crecimiento asta cruzar la sección transversal del castillo Sur para la carga máxima de ese ciclo 4 positivo ($R=0.0003$). Esta misma grieta se presentó en el lado Norte del muro para la carga máxima del ciclo 4 negativo.

Para una carga $V=14685$ kg ($R=0.0016$) en el ciclo 5 positivo se presentó la primer grieta por cortante con espesor de 0.4mm, esto ocurrió en el lado Sur del muro, a 80 cm de su base, que comenzó en el castillo Sur y descendió de forma escalonada hasta alcanzar la primer junta horizontal de mortero. En este mismo semi-ciclo se formó la grieta principal del lado sur, a una altura de 160 cm desde la

base que descendió dos hileras de block en forma escalonada, además, aparecieron la mayoría de las grietas por flexión a largo del castillo Sur.

Posteriormente, en el ciclo 5 negativo se presentaron una serie de agrietamientos diagonales que comenzaban en la parte baja del castillo Norte y agrietamientos por flexión a lo largo de toda la altura de dicho castillo. Para la carga $V= 13136 \text{ kg}$ ($R=0.0018$) se presentó una súbitamente la grieta principal por cortante que inicio iba desde el extremo superior del castillo Norte hasta al extremo inferior del castillo Sur, alcanzando un espesor de 9 mm. Dicha grieta impidió que en los ciclos posteriores se pudiera tener un incremento en la carga lateral aplicada. En la figura 4.4 se observa la ubicación de las grietas principales del lado Norte y Sur del muro.

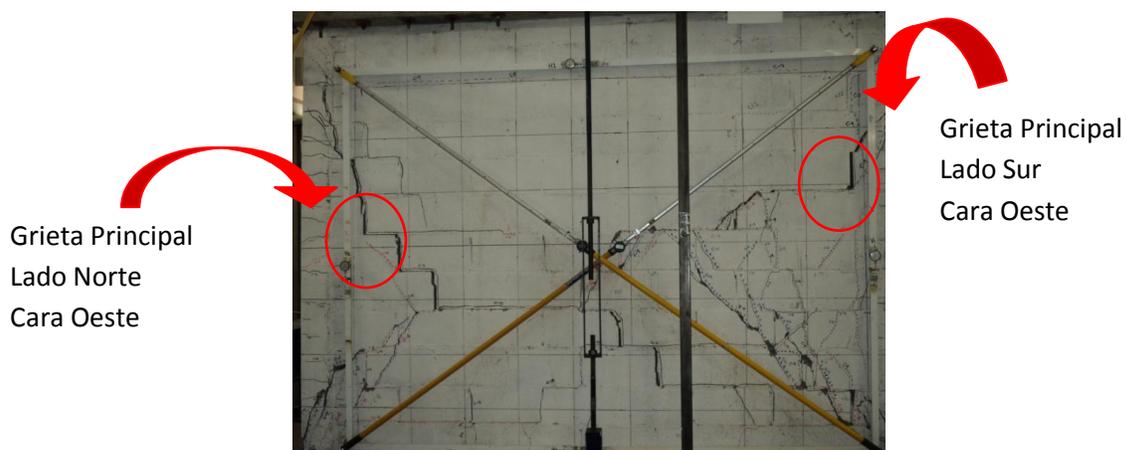


Figura 4.4. Ubicación de las grietas principales del muro M1-SR.

En el ciclo 6 positivo se presentaron agrietamientos considerables en el extremo superior del castillo Sur, donde se generó una grieta vertical entre el castillo y la mampostería. Además, de agrietamientos considerables que comenzaban en la parte inferior Norte de la mampostería y que penetraban el castillo, esto para una carga $V=13216 \text{ kg}$ ($R=0.0015$).

También se presentaron agrietamientos inclinados en los extremos del castillo Norte y daños en la esquina inferior Sur del muro esto en el ciclo 6 negativo para $V=10279 \text{ kg}$ y $R= 0.0075$.

Durante el ciclo 7 y 8 se presentaron únicamente agrietamientos horizontales en la junta de mortero más alta. En el ciclo 9 para $V= 10092$ Kg ($R=0.004$) se presentó triturado de las piezas de mampostería en la parte inferior Sur del muro.

Al alcanzar una distorsión $R=0.0068$ ($V=11614$ kg) el ciclo 11 se presentó desprendimiento de mampostería en la parte baja del lado sur. La prueba se suspendió en el ciclo 12 para una distorsión $R=0.0061$ ($V=9131$ kg) debido a que el nivel de daño presentado en el muro ya era considerable, además, de que se presentó una disminución de carga del 38%.

En todo el proceso de Ensaye se estuvieron monitoreando los espesores de las grietas principales, en la tabla 4.1 se observan la carga de cada semi-ciclo y su distorsión correspondiente, además en ella se muestra los espesores de las grietas principales, tanto del lado Norte como del lado Sur. En la figura 4.5 se puede apreciar algunas etapas de las secuencias del daño durante el ensaye, en ellas se indica para que ciclo, su carga máxima y su distorsión asociada.

Tabla 4.1. Valores máximos de carga para cada semi-ciclo con sus respectivas deformaciones y espesores de grietas (M1-SR).

CICLOS	Semi-ciclos Positivos			Semi-ciclos Negativos		
	Vmax (kg)	Distorsión	Espesor Grieta Sur(mm)	Vmax (kg)	Distorsión	Espesor Grieta Norte(mm)
C1	3364	0.000133	-	-2990	-0.000105	-
C2	3738	0.000155	-	-3738	-0.000136	-
C3	7209	0.000338	-	-7209	-0.000294	-
C4	7209	0.000340	-	-7209	-0.000311	-
C5	14685	0.001666	0.4	-13136	-0.001861	9
C6	13246	0.001522	6	-10279	-0.007504	17
C7	9718	0.002036	13	-5233	-0.002074	19
C8	8971	0.002045	13	-5259	-0.002060	18
C9	10092	0.003479	18	-8944	-0.003718	20
C10	5526	0.040710	23	-10279	-0.004087	18
C11	7876	0.006138	19	-13991	-0.004922	24
C12	8437	0.006094	-	-9131	-0.006177	-

En la tabla 4.1 se puede observar que una vez alcanzada la carga de agrietamiento calculada ya no aumentó la capacidad de carga.

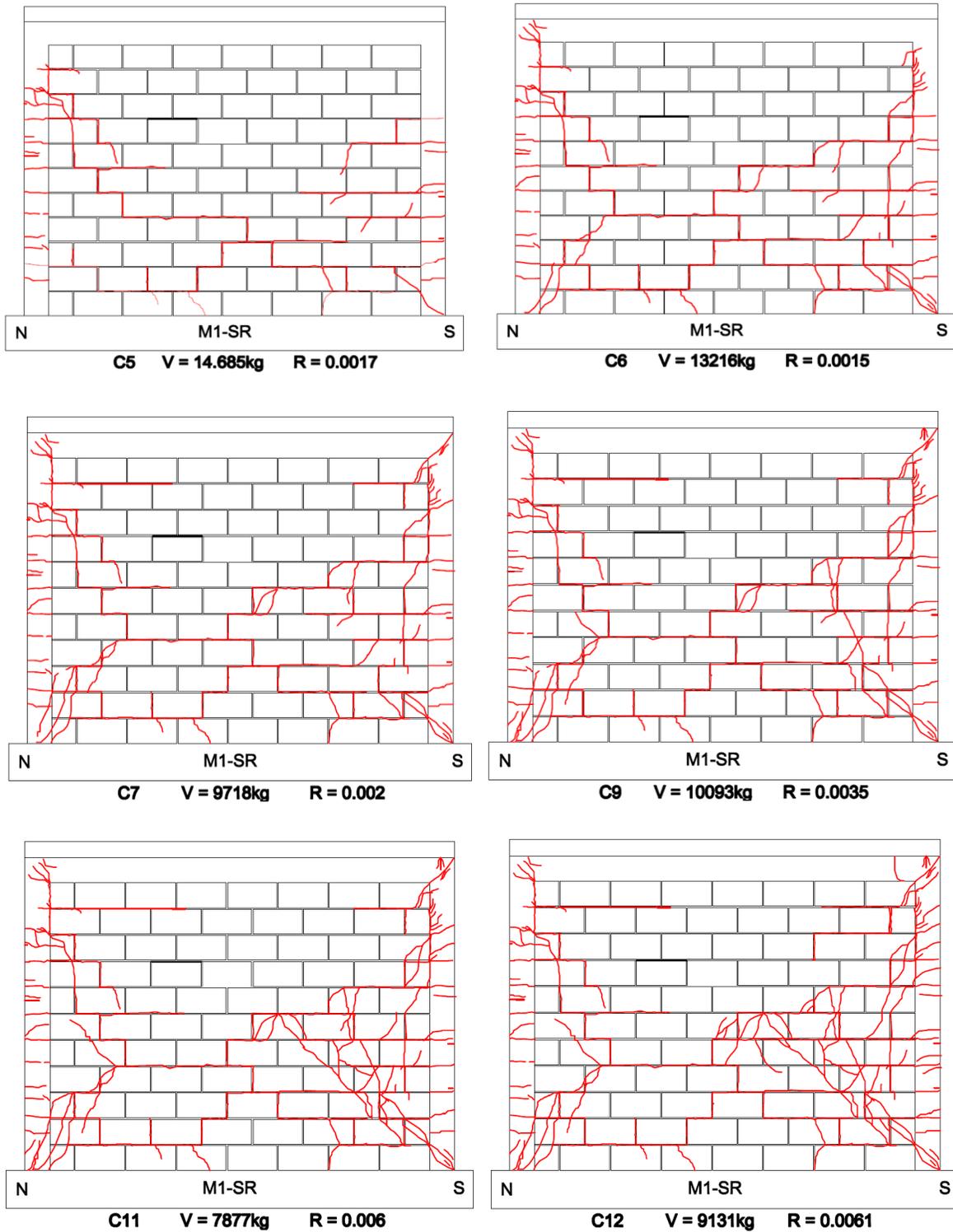


Figura 4.5. Evolución del daño en el muro M1-SR.

En la Figura 4.6 se muestran fotografías del daño total generado al someterlo al proceso de carga.



a)



b)



c)



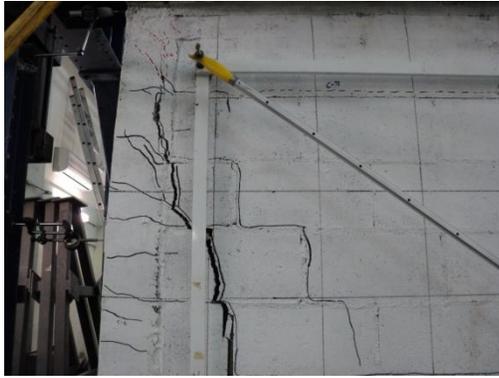
d)



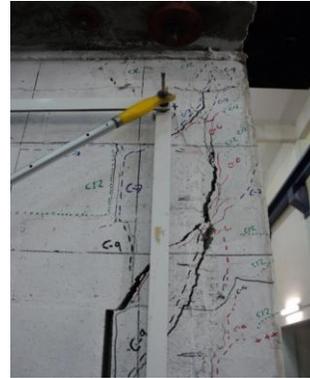
e)



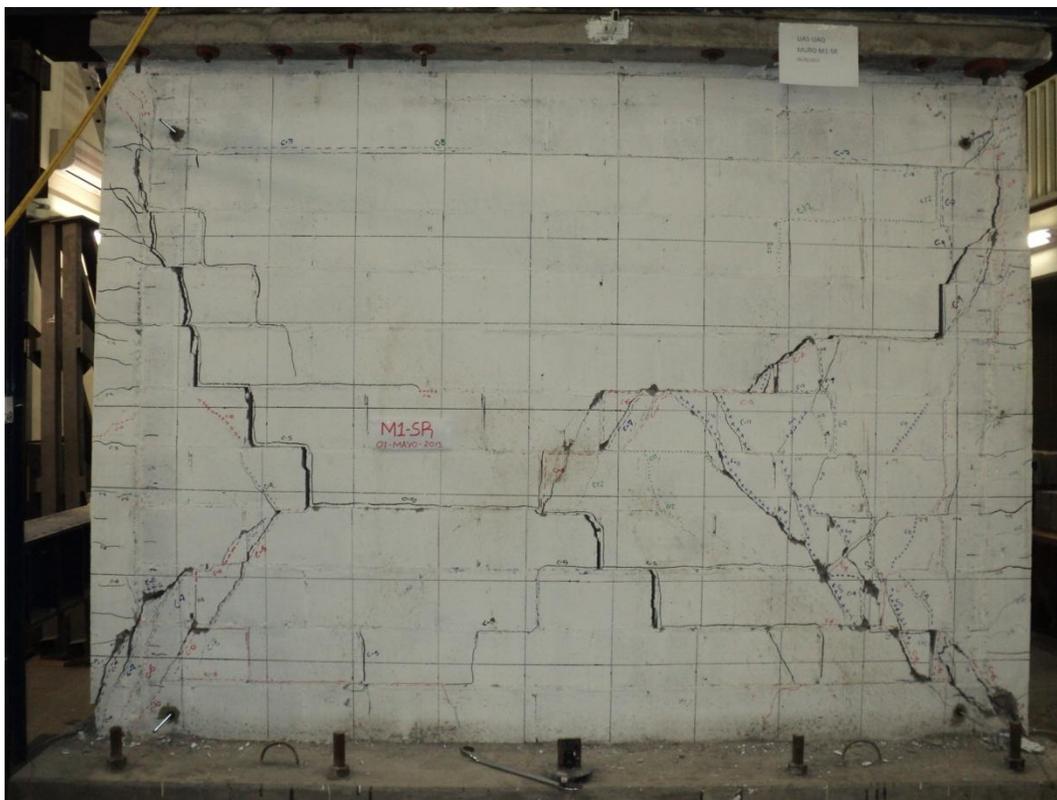
f)



g)



h)



i)

Figura 4.6. Evidencia del daño en el muro M1-SR: a) Base del Castillo Norte, b) Base del castillo Sur, c) Grieta principal Norte, d) Grieta principal Sur, e) Daño en la mampostería, parte inferior Norte, f) Daño en la mampostería, parte inferior Sur, g) Daño en la mampostería, parte superior Norte, h) Daño en la mampostería, parte superior Sur, i) Daño total del muro.

En la Figura 4.7 se muestra la curva histerética. En ella se grafican la carga lateral contra la distorsión. Los ciclos histeréticos que se observan son característicos de muros de mampostería confinada.

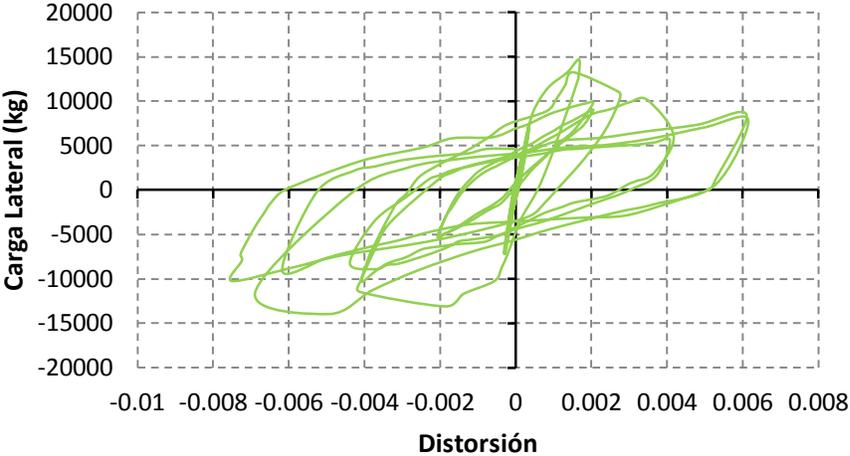


Figura 4.7. Curvas de histéresis del espécimen M1-SR.

Los ciclos efectuados antes del primer agrietamiento manifestaron un comportamiento aproximadamente elástico-lineal. Después de presentarse el primer agrietamiento diagonal se puede apreciar un ensanchamiento de los lazos histeréticos, como se aprecia en la figura 4.8, donde se comparan el ciclo 1, ciclo 5 y 12.

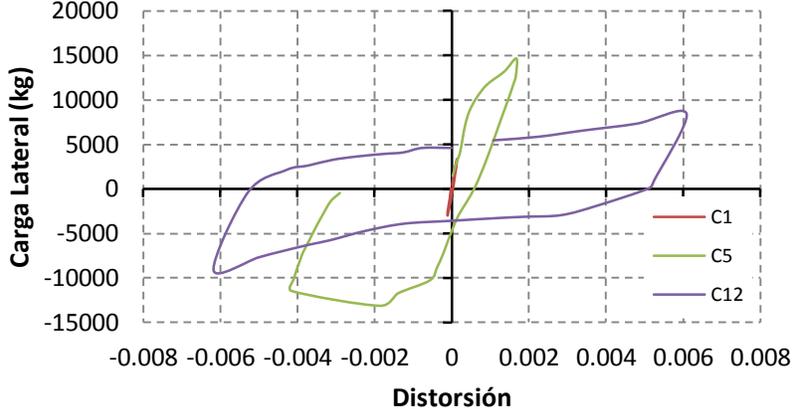


Figura 4.8. Comparación de los lazos histeréticos del Ciclo 1,5 y 12.

En la Figura 4.9 se muestran las envolventes de respuesta para los primeros ciclos y los ciclos de repetición, en ella se indican el valor de la carga y distorsión para la que se presentaron el primer agrietamiento por flexión y el primer agrietamiento diagonal del muro. También se presentan los valores de resistencia teóricos obtenidos con la ecuación 5 de las NTCMRCDF 2004, en la que $(V_R)_{RDF}$ fue obtenida a partir de utilizar $F_R=1$ y $V_m^* = 6.46 \text{ kg/cm}^2$ (resistencia promedio obtenido de los ensayos de muretes). Para $(V_R)^*_{RDF}$ se utilizó $F_R=0.7$ y $V_m^* = 4.41 \text{ kg/cm}^2$ (resistencia de diseño obtenido de los ensayos de muretes). En ambos casos se consideró una carga vertical igual a 7000 kg.

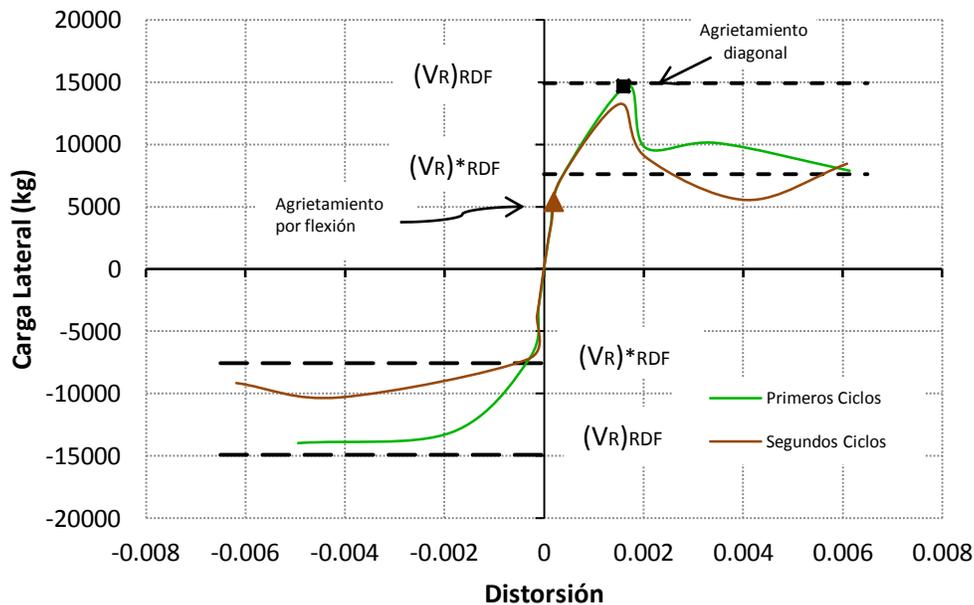
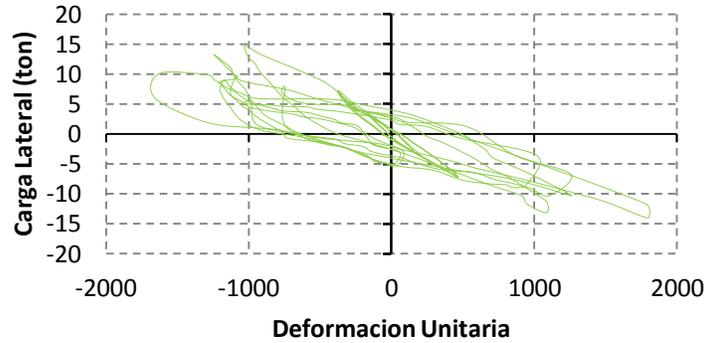
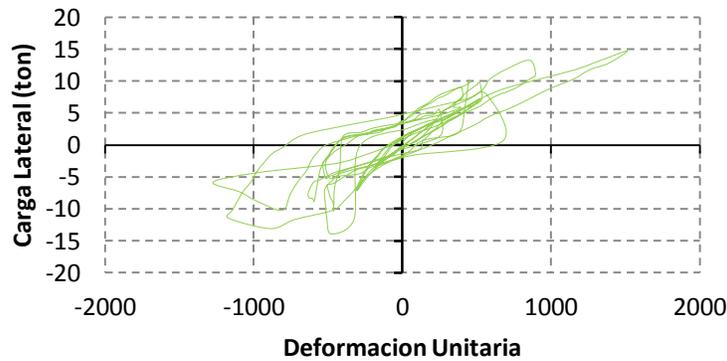


Figura 4.9. Envolventes de Respuesta del espécimen M1-SR.

Los medidores de deformaciones colocados en el acero de refuerzo del castillo Norte y Sur del muro indicaron que alcanzaron una deformación de $0.86 f_y$ y $0.72 f_y$ respectivamente. La figura 4.10 muestra las gráficas carga lateral deformación unitaria del acero para el castillo Norte y Sur.



a) Castillo Norte.



b) Castillo Sur.

Figura 4.10. Carga lateral-deformación unitaria del acero del muro M1-SR.

Como ya se mencionó al principio de este capítulo, la distorsión total R es la suma de la distorsión por cortante R_c y la distorsión por flexión R_f . En la figura 4.11 se muestra la gráfica de la contribución de dichas distorsiones a la distorsión total para la envolvente de los primeros ciclos. Se puede apreciar en esta gráfica que la distorsión por cortante es prácticamente nula hasta antes del primer agrietamiento por flexión y que la contribución a la distorsión por flexión desaparece al presentarse el primer agrietamiento por cortante.

En la figura 4.12 se muestra el perfil de desplazamiento lateral del castillo Norte para las cargas máximas de los ciclos positivos y negativos. En ella se puede apreciar que su desplazamiento fue lineal durante los primeros ciclos,

después de que se originaron los primeros agrietamientos dicho comportamiento dejó de ser lineal.

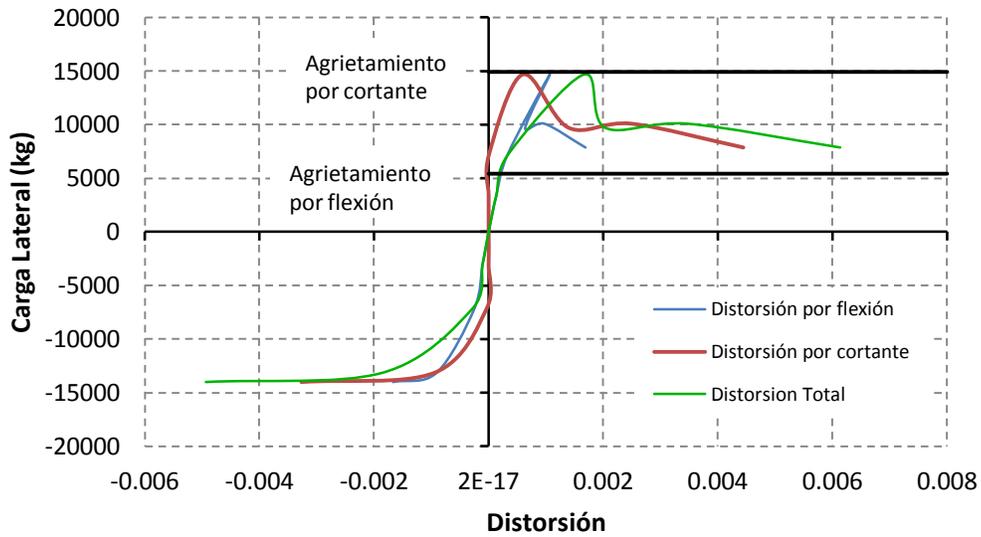
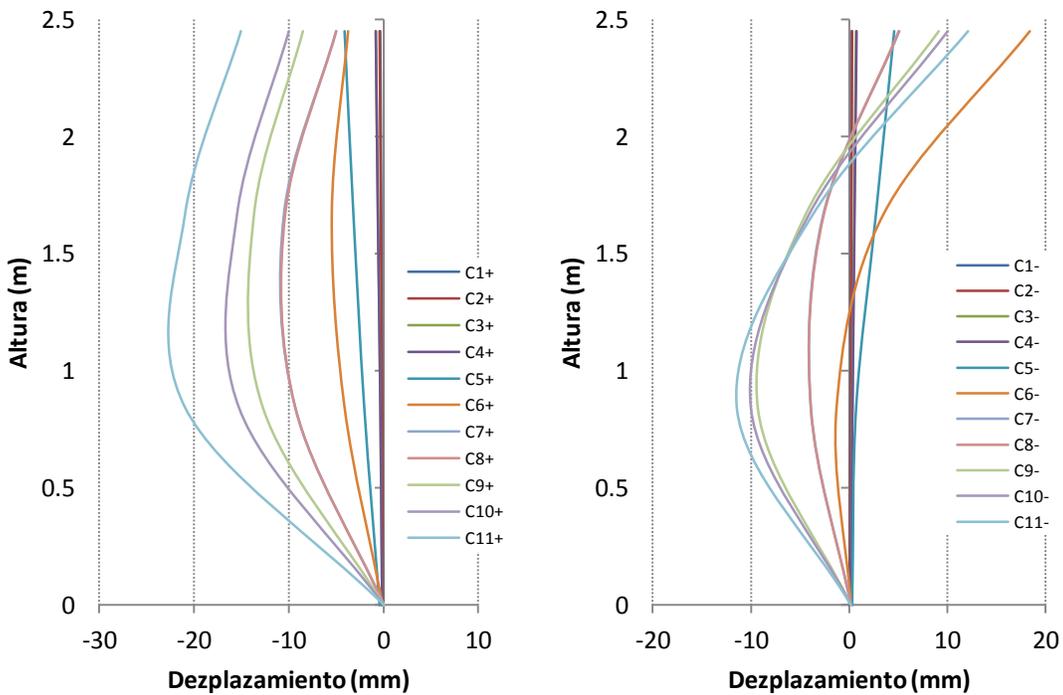


Figura 4.11. Contribución a la distorsión total.

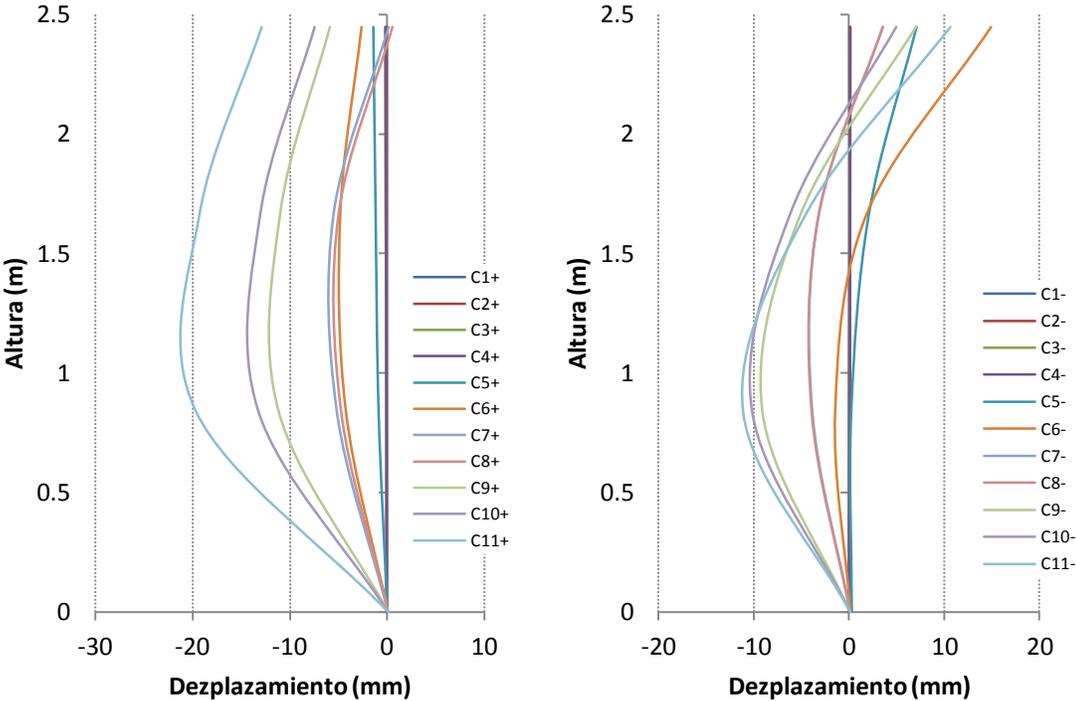


a) Ciclos Positivos.

b) Ciclos Negativos.

Figura 4.12. Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para cargas máximas.

En la figura 4.13 se muestra el mismo perfil de desplazamiento lateral del castillo Norte pero ahora para la carga lateral igual a cero para el final de los ciclos positivos y negativos. Se puede observar que en los primeros cuatro ciclos el desplazamiento residual del castillo era casi nulo.



a) Ciclos Positivos.

b) Ciclos Negativos.

Figura 4.13. Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para carga lateral igual a cero.

3.- Muro Confinado-reforzado con varillas de GFRP

El muro M2-CR fue construido en las mismas condiciones y materiales que el muro M1-SR. Al momento de ser construido se ranuraron las juntas de mortero donde se colocarían el refuerzo horizontal con varillas de GFRP número 3. Una vez que paso del periodo de curado, se adhirieron las varillas de GFRP con resina epóxica Sikadur 31 HMG. El refuerzo se colocó en las juntas de mortero cubriendo 0.5 m. de cada lado de las diagonales. Las varillas se ubicaron en ambas caras del muro. Con la colocación de dicho refuerzo se pretendía que

contribuyera a un incremento a la resistencia, a la rigidez lateral, así como, una mejor distribución del patrón de agrietamiento (Figura 4.14).

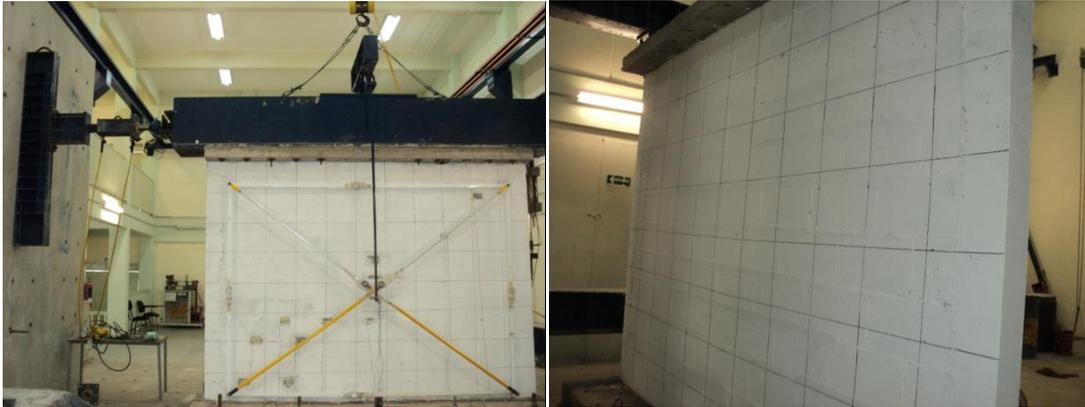


Figura 4.14. Muro M2-CR antes del proceso de carga.

El proceso de ensaye fue similar al utilizado en el muro M1-SR, aplicando inicialmente la carga vertical (7000kg), en la segunda etapa se aplicó la carga lateral, con dos ciclos al 25% de la carga de agrietamiento (3722 kg), dos ciclos al 50% (7445kg) y por último dos ciclos con el 100% de la carga estimada (14890 kg). En la tercera etapa se lleva el control por distorsión, con dos ciclos para distorsión de 0.002 y dos últimos ciclos para la distorsión de 0.004. No se pudo llegar a la misma distorsión alcanzada en el espécimen M1-SR debido a que se logró la máxima capacidad de carga del equipo (25000 kg), alcanzando una carga lateral aplicada de 22508 kg. En la figura 4.15 se muestra la historia de carga aplicada al muro.

De igual manera que en el espécimen M1-SR, durante el ensaye se llevó un registro del agrietamiento para diferentes niveles de carga, al mismo tiempo que sobre el muro se fueron señalando dichas grietas, colocándoles marcas en forma secuencial por ciclos según se fueron presentando. El señalamiento de grietas se hizo en ambas caras del muro. Las grietas se presentaron en todo el espesor del muro y se formaron casi simultáneamente en ambas caras.

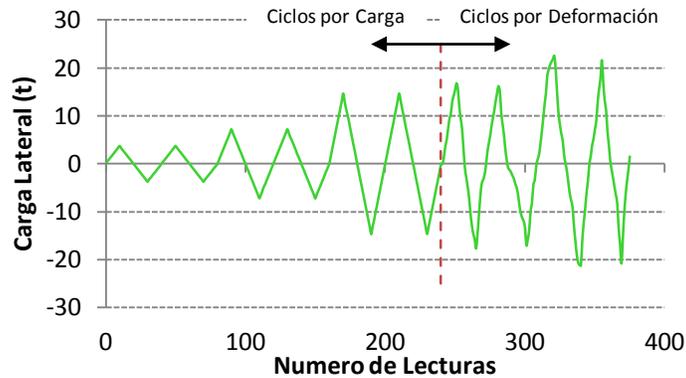


Figura 4.15. Historia de carga del Espécimen M2-CR.

En los primeros cuatro ciclos no se presentó ningún agrietamiento en el muro. El primer indicio de daño fue en el ciclo 5 positivo al presentarse el primer agrietamiento por flexión en el castillo Sur a una altura de 0.84m desde la base, esto para una carga lateral $V = 10,653.3 \text{ Kg}$ ($R = 0.0005$). Posteriormente, en este ciclo 5 positivo, para una carga $V = 12,896 \text{ Kg}$ ($R = 0.0006$), se presentó el primer agrietamiento por cortante que inicio justo donde terminaba el primer agrietamiento por flexión y descendió en forma diagonal hasta llegar a la primera junta de mortero (Figura 4.16).



Figura 4.16. Primer indicio de daños del muro M2-CR.

Para la carga máxima ($V = 14,685 \text{ kg}$ y $R = 0.001$) de ese ciclo positivo, apareció una de las grietas principales que iniciaba a 1.68 m. de la base en el lado

Sur del muro y descendió dos hiladas de forma escalonada. El espesor de la primera grieta por cortante era de 0.3 mm. para este nivel de carga.

Durante el ciclo 5 negativo para una carga de $V = 8,010 \text{ kg}$ ($R = 0.0002$) surgió el primer agrietamiento por flexión en el castillo Norte a 1.05 m. desde la base del mismo. Enseguida para una carga $V = 10,093 \text{ Kg.}$ ($R = 0.0004$) se presentó el primer agrietamiento por cortante del lado Norte del muro, que iniciaba donde terminaba el primer agrietamiento por flexión y descendía de forma escalonada una tres hileras de mampostería.

Al alcanzar la carga máxima del ciclo 5 negativo ($V = 14,685 \text{ kg}$ y $R = 0.001$), el castillo Norte presentaba la mayoría de los agrietamientos por flexión desde su base hasta 1.68 m. de altura. Para este nivel de carga se había formado el la grieta principal del lado norte. El espesor del primer agrietamiento por cortante era de 1 mm. En la Figura 4.17 se muestra la ubicación de las grietas principales.

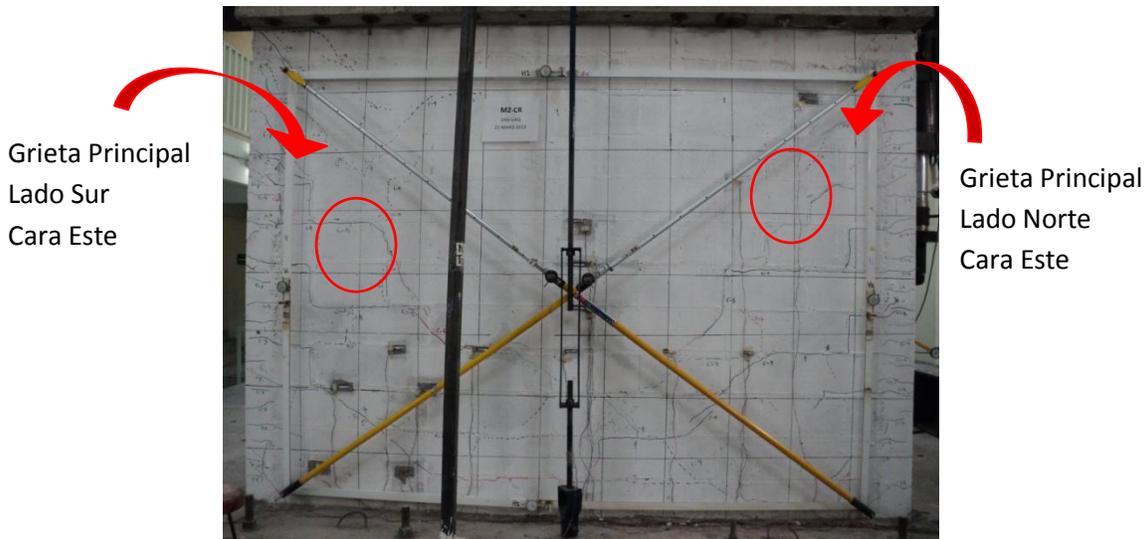


Figura 4.17. Ubicación de las grietas principales del muro M2-CR.

En el ciclo 6 se alcanzó una carga $V = 14,685 \text{ Kg}$ ($R = 0.0011$) y solamente se extendieron un poco mas las grietas generadas en el ciclo 5, además, se presento una grieta horizontal en la parte baja del muro.

A lo largo del ciclo 7 se prolongaron aun mas los agrietamientos del ciclo 5 y 6, también se presentaron grietas por flexión en la parte baja del castillo Sur y en la parte alta del castillo Norte.

Surgieron agrietamientos en la parte superior Norte del muro en el ciclo 9 para una carga $V = 22,508$ kg y $R = 0.0034$. La prueba se suspendió en el ciclo 10 para una distorsión $R = 0.0036$ ($V = 21,654$ kg), debido a que la capacidad de carga de la celda era de 25,000 kg y no se quería llevar a su máxima capacidad por temor a dañarla.

En todo el proceso de Ensaye se estuvieron monitoreando los espesores de las grietas principales, en la tabla 4.2 se observan la carga de cada semi-ciclo y su distorsión correspondiente, además en ella se muestra los espesores de las grietas principales, tanto del lado Norte como del lado Sur. En la figura 4.18 se puede apreciar algunas etapas de las secuencias del daño durante el ensaye, en ellas se indica para que ciclo, su carga máxima y su distorsión correspondiente.

Tabla 4.2. Valores máximos de carga para cada semi-ciclo con sus respectivas deformaciones y espesores de grietas (M2-CR).

CICLOS	Semi-ciclos Positivos			Semi-ciclos Negativos		
	Vmax (kg)	Distorsión	Espesor Grieta Sur(mm)	Vmax (kg)	Distorsión	Espesor Grieta Norte(mm)
C1	3738	7.3624E-05	-	-3738	-0.0000816	-
C2	3738	7.9273E-05	-	-3738	-7.4065E-05	-
C3	7209	0.00023945	-	-7209	-0.0002037	-
C4	7209	0.00023653	-	-7235.7	-0.00021767	-
C5	14685	0.00097663	0.3 (GC)	-14685	-0.00104135	1 (GC)
C6	14685	0.00105161	0.8	-14658.3	-0.00111602	1.25
C7	16821	0.00147712	1	-17702.1	-0.00148239	1.5
C8	16233.6	0.0014922	1.25	-17034.6	-0.00147491	1.5
C9	22508.1	0.00338226	4	-21253.2	-0.00227047	1.5
C10	21653.7	0.00361565	4.5	-20826	-0.00237513	1.5

GC : Primer Grieta por Cortante

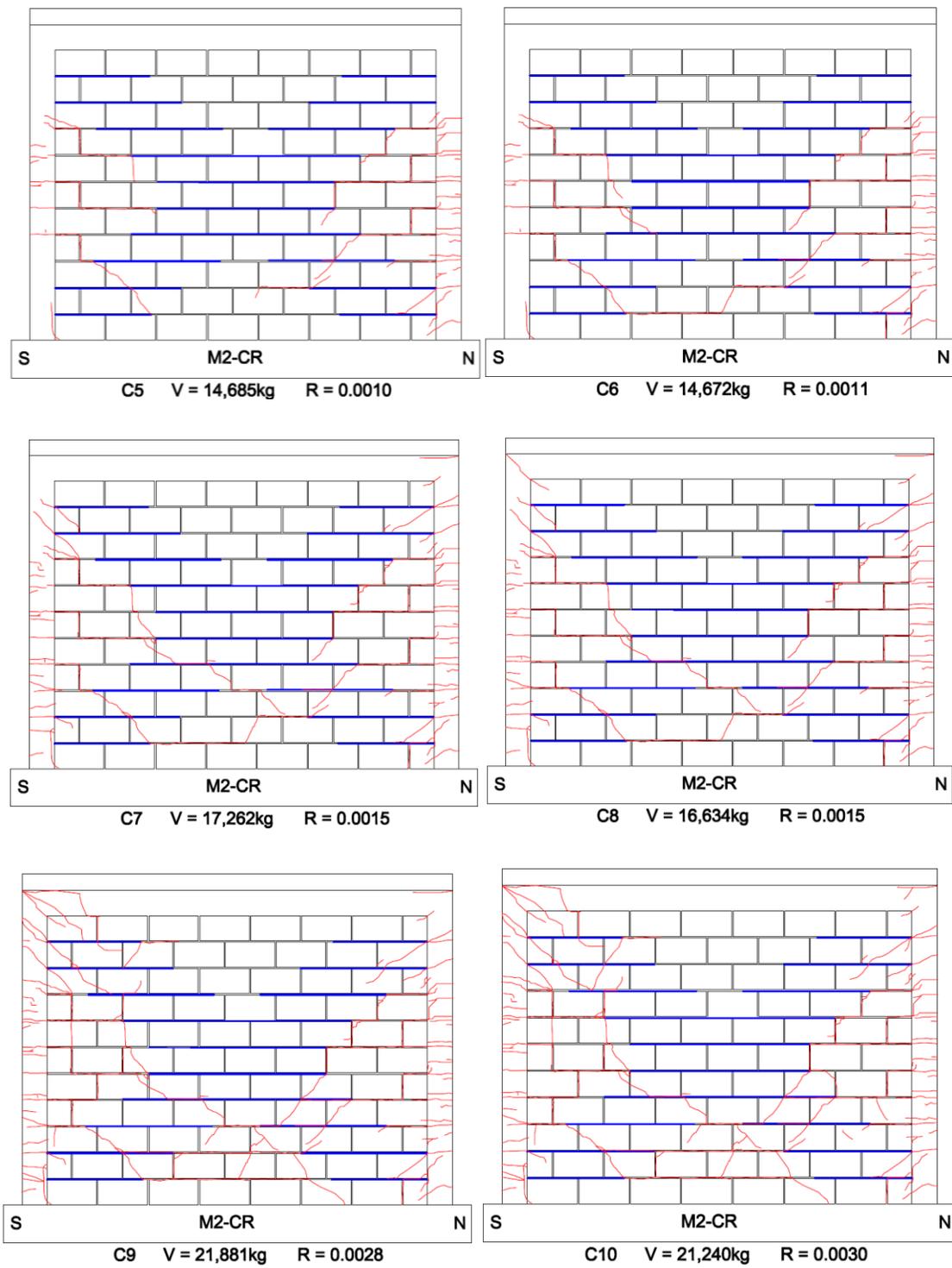


Figura 4.18. Evolución del daño en el muro M2-CR.

En la Figura 4.19 se muestran fotografías del daño total generado al someterlo al proceso de carga.



a)



b)



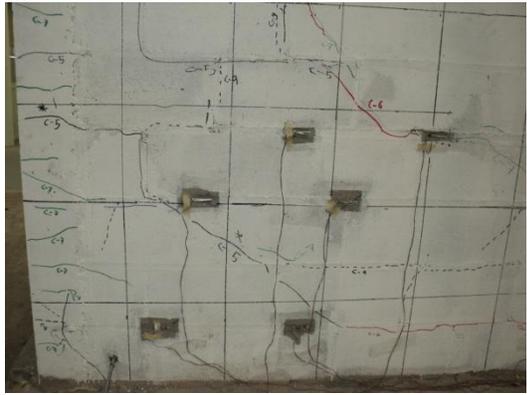
c)



d)



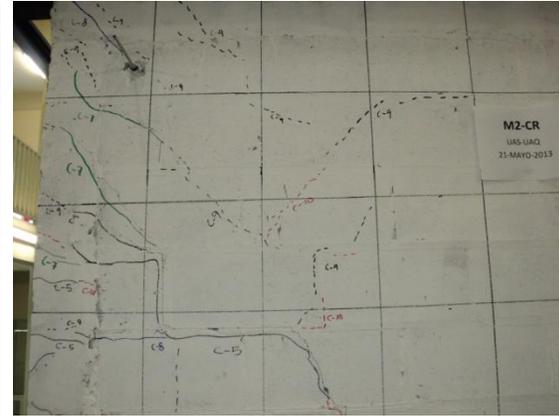
e)



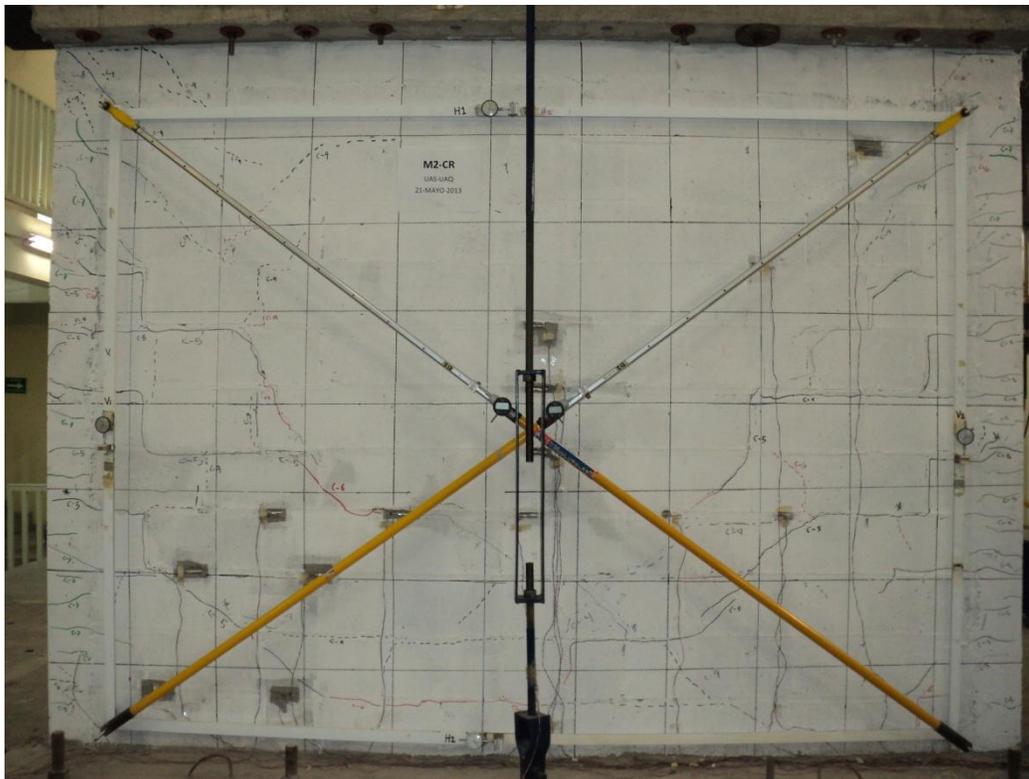
f)



g)



h)



i)

Figura 4.19. Evidencia del daño en el muro M2-CR: a) Base del Castillo Norte, b) Base del castillo Sur, c) Grieta principal Norte, d) Grieta principal Sur, e) Daño en la mampostería, parte inferior Norte, f) Daño en la mampostería, parte inferior Sur, g) Daño en la mampostería, parte superior Norte, h) Daño en la mampostería, parte superior Sur, i) Daño total del muro.

En la Figura 4.20 se muestra la curva histerética correspondiente al muro M2-CR.

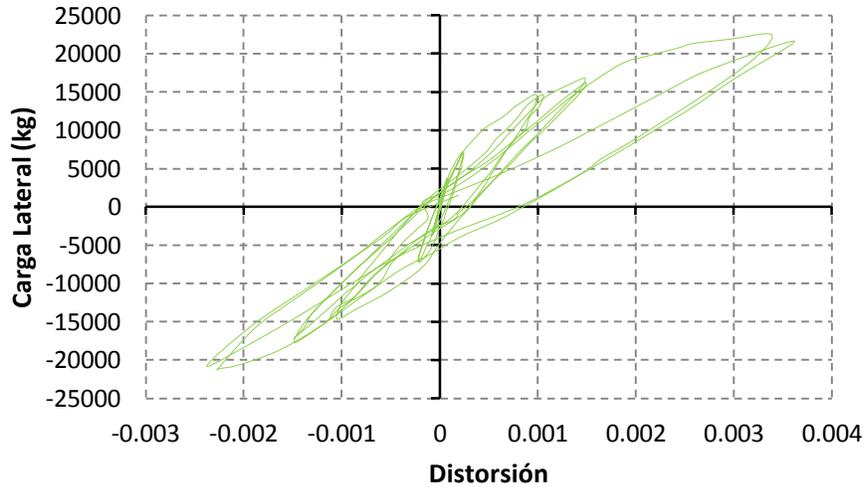


Figura 4.20. Curvas de histéresis del espécimen M1-SR.

Los ciclos efectuados antes del primer agrietamiento manifestaron un comportamiento aproximadamente elástico-lineal. Después de Presentarse el primer agrietamiento diagonal se puede apreciar un ensanchamiento de los lazos histeréticos y estos cada vez mas acostados, indicio de la perdida de rigidez como se aprecia en la figura 4.21, donde se comparan el ciclo 1, ciclo 5 y 12.

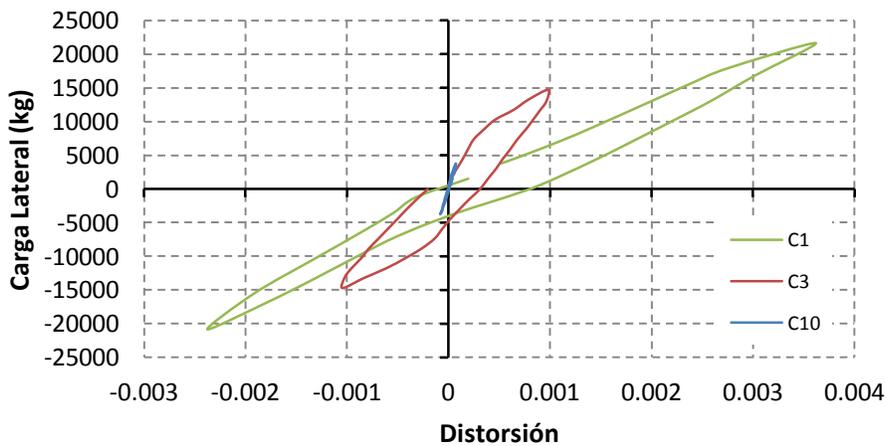


Figura 4.21. Comparación de los lazos histeréticos del Ciclo 1,5 y 12.

En la Figura 4.22 se muestran las envolventes de respuesta para los primeros ciclos y los ciclos de repetición, al igual que en el muro M1-SR, se indican el valor de la carga y distorsión para la que se presentaron el primer agrietamiento por flexión y el primer agrietamiento diagonal del muro. También se indican los valores de resistencia teóricos obtenidos con la ecuación 5 de las NTCMRCDF 2004, obtenidos de igual manera que para el espécimen M1-SR.

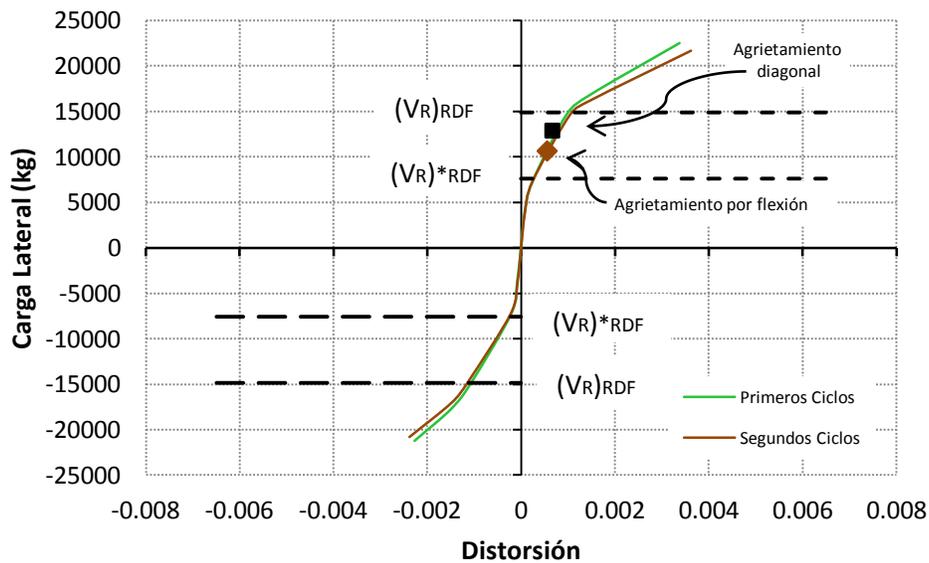
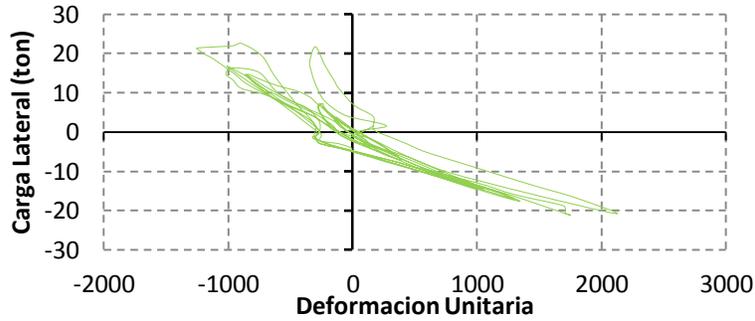
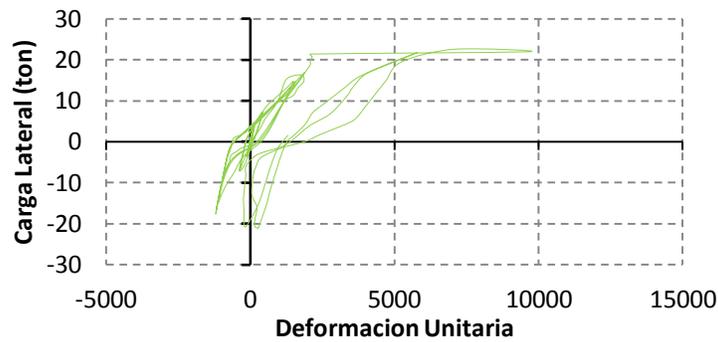


Figura 4.22. Envolventes de Respuesta del espécimen M1-SR.

En la figura 4.23 se muestran las curvas deformación unitaria- carga lateral del el acero de refuerzo del castillo Norte y Sur. En la grafica se observa que el el acero de refuerzo del castillo Norte fluyo en el ciclo 10 negativo para una carga lateral $V = 20,826$ kg. Por otro lado el acero del castillo Sur fluyo para una carga $V = 19,700$ kg en el ciclo 9 positivo.



a) Castillo Norte.



b) Castillo Sur.

Figura 4.23. Carga lateral-deformación unitaria del acero del muro M2-CR.

En la figura 4.24 se muestra la grafica de la contribución de la distorsión por flexión a la distorsión total. En ella se indican los valores de carga para los cuales se inicio el agrietamiento por flexión y por cortante.

En la figura 4.25 se muestra el perfil de desplazamiento lateral del castillo Norte para las cargas máximas de los ciclos positivos y negativos. En la figura 4.26 se muestra el mismo perfil de desplazamiento lateral del castillo Norte pero ahora para la carga lateral igual a cero para el final de los ciclos positivos y negativos.

Tanto en la figura 4.25 y 4.26 se puede apreciar que hubo movimiento de cuerpo rígido del muro respecto a la viga de cimentación, el desplazamiento máximo registrado fue de 1.5 mm. Este desplazamiento se corrigió a la hora de calcular la distorsión total del muro.

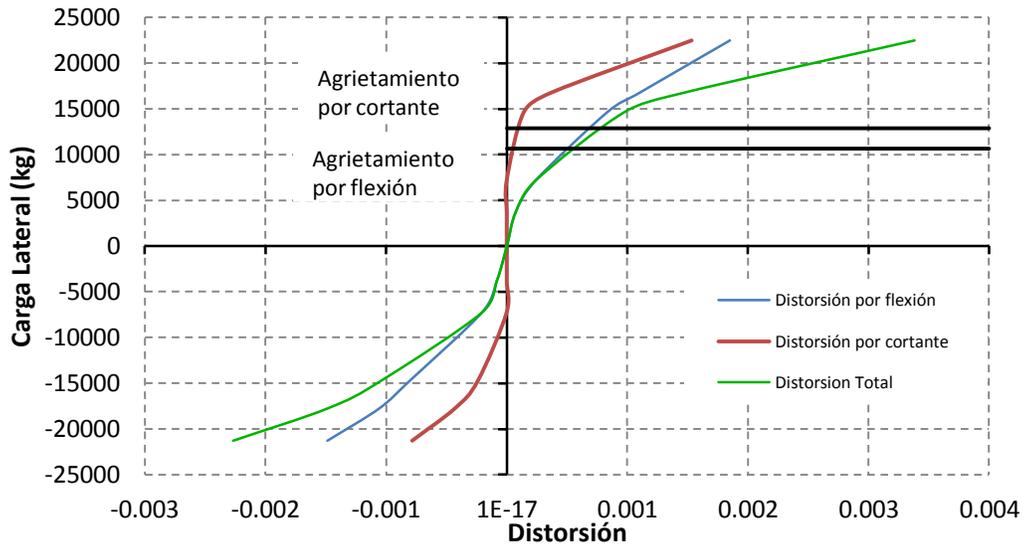
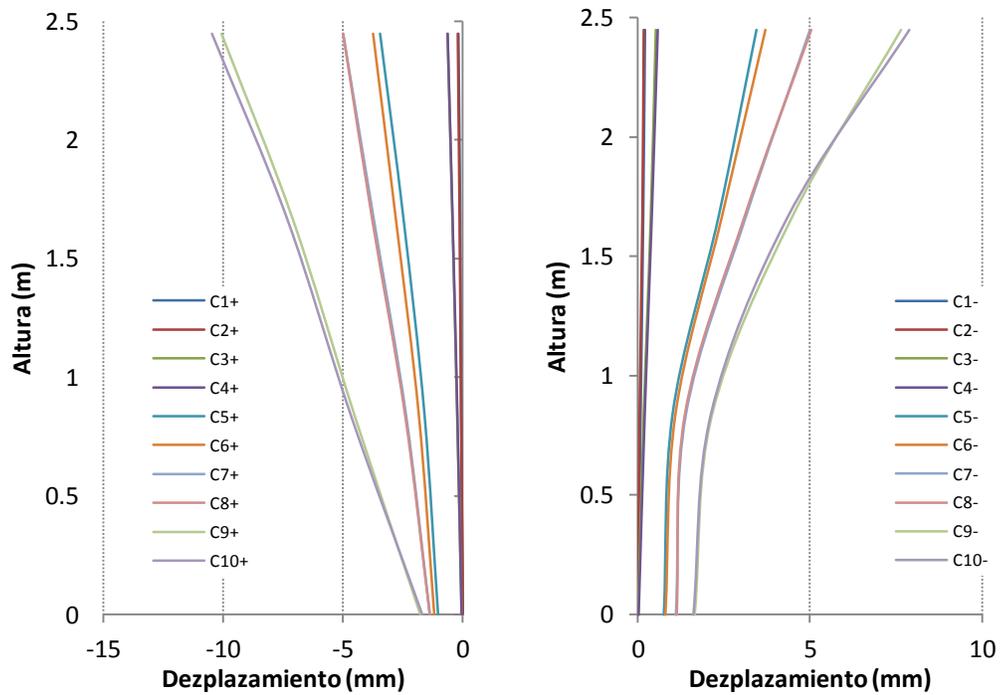


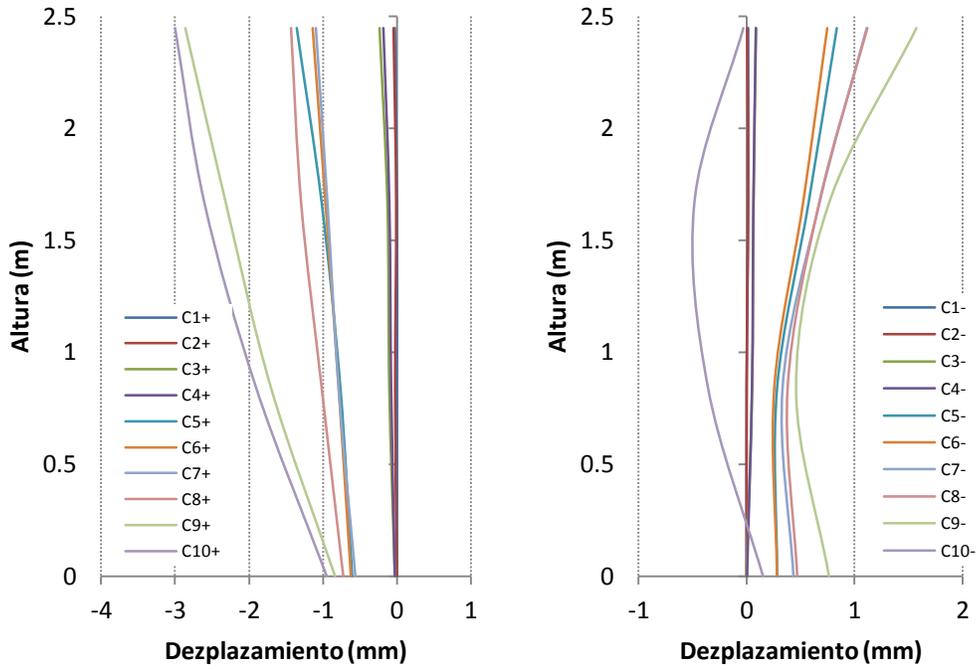
Figura 4.24. Contribución a la distorsión total.



a) Ciclos Positivos.

b) Ciclos Negativos.

Figura 4.25. Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para cargas máximas.



a) Ciclos Positivos.

b) Ciclos Negativos.

Figura 4.26. Perfil desplazamiento lateral del castillo Norte para carga lateral igual a cero.

V. DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de los dos especímenes. En la primer parte, se hace una revisión de la resistencia, posteriormente se analiza la rigidez lateral y la pérdida de esta a lo largo del ensaye. También se presentan parámetros como energía y capacidad de deformación. Dicha comparación se enfoca a evaluar la eficiencia del refuerzo con GFRP.

1.- Resistencia

Por lo general el término de resistencia se refiere a la carga máxima que una estructura es capaz de soportar. Durante el ensaye se obtuvieron parámetros como la carga máxima y la carga al primer agrietamiento diagonal. El análisis de la resistencia consistió en la comparación de los parámetros obtenidos experimentalmente con aquellos obtenidos utilizando las expresiones de las NTCMRCDF 2004.

La fuerza cortante de diseño para muros de mampostería confinados se determina según la siguiente ecuación:

$$V_{mR} = F_R(0.5 * v_m * A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R * v_m * A_T \dots\dots\dots 5$$

donde:

V_{mR} es la resistencia a carga lateral de muros de mampostería confinada.

F_R es el factor de reducción de resistencia

v_m^* es el esfuerzo cortante de diseño de la mampostería.

A_T es el área bruta de la sección transversal en la dirección de la carga.

P es la carga vertical que actúa sobre el muro.

La estimación de la carga de agrietamiento se realizó en función de las dimensiones reales de los modelos y de las propiedades mecánicas de los materiales, así como, de utilizar el factor de reducción igual a 1. De este modo utilizando $v_m = 6.46 \text{ kg/cm}^2$ (valor promedio obtenido a partir del ensaye de

muretes), la carga vertical $P = 7000 \text{ kg/cm}^2$ y $F_R = 1$, en la ecuación 5, $V_{mR} = 14890 \text{ kg}$.

Por otro lado, si la resistencia a carga lateral se calculara utilizando el esfuerzo cortante de diseño $v^*_m = 4.41 \text{ kg/cm}^2$ y $F_R = 0.7$, resulta $V^*_{mR} = 7582 \text{ kg}$. Debe recordarse que V_{mR} representa la mejor estimación de las NTCMRCDF 2004 en relación a la resistencia de los muros ante fuerza cortante.

En la figura 5.1 se muestran las envolventes de respuesta de los primeros ciclos positivos del muro M1-SR, en ella se indican el primer agrietamiento a flexión, primer agrietamiento a cortante y los valores teóricos de resistencia.

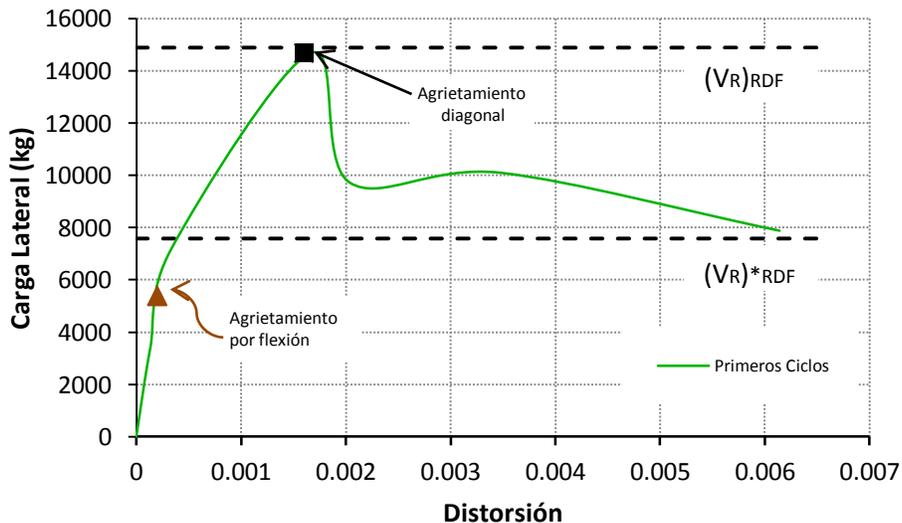


Figura 5.1. Envolvente de respuesta primeros ciclos positivos del muro M1-SR.

En la figura 5.1 se pueden reconocer tres etapas principales en el comportamiento general del muro ensayado. La etapa inicial exhibió una relación lineal entre la carga y la distorsión. Esta etapa terminó poco antes de la aparición del primer agrietamiento por flexión. La etapa intermedia se pudo acotar por el primer agrietamiento por flexión y por el primer agrietamiento inclinado (cortante máximo). En la tercera etapa se presentó una pérdida rápida de la resistencia quedando definida por el cortante máximo resistido y la distorsión última a la que estuvo sujeto el espécimen.

El comportamiento del muro M2-CR se observa en la figura 5.2 donde se muestran las envolventes de respuesta de los primeros ciclos positivos, de igual manera en ella se indican el primer agrietamiento a flexión, primer agrietamiento a cortante y los valores teóricos de resistencia.

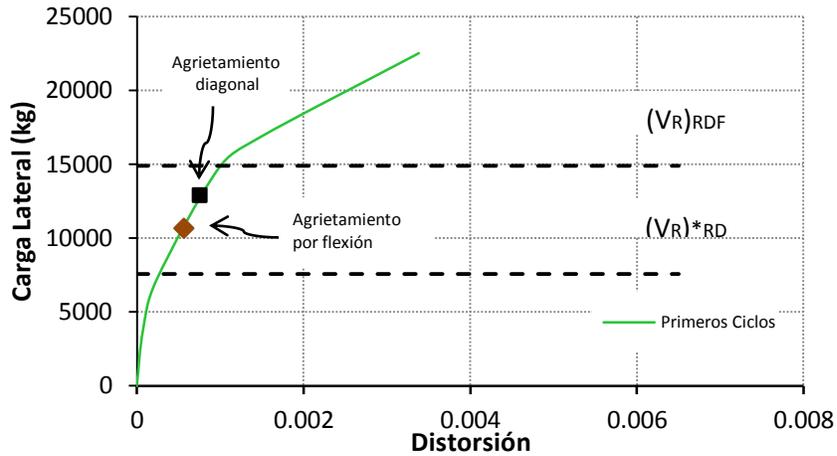


Figura 5.2. Envolvente de respuesta primeros ciclos positivos del muro M2-CR.

En la figura 5.2 se pueden apreciar tres etapas de comportamiento. La primera etapa termina mucho antes de presentarse el primer agrietamiento por flexión, la segunda etapa termina cuando se alcanza la carga de agrietamiento estimada y la tercer etapa estuvo caracterizada de un pequeño incremento de la carga con el aumento de la distorsión y no se puede apreciar el fin de esta etapa debido a que se tubo que parar la prueba.

En la figura 5.3 se muestra la comparación grafica del comportamiento de los muros.

En la tabla 5.1 se presentan los valores experimentales de resistencia encontrados: fuerza cortante de agrietamiento, fuerza cortante máxima y sus distorsiones correspondientes, se presentan además las resistencias teóricas $(V_R)_{RDF}$ y $(V_R)_{*RDF}$, calculados anteriormente con la ecuación 5. En la tabla 5.2 se muestra la relación entre las resistencias encontradas para cada muro.

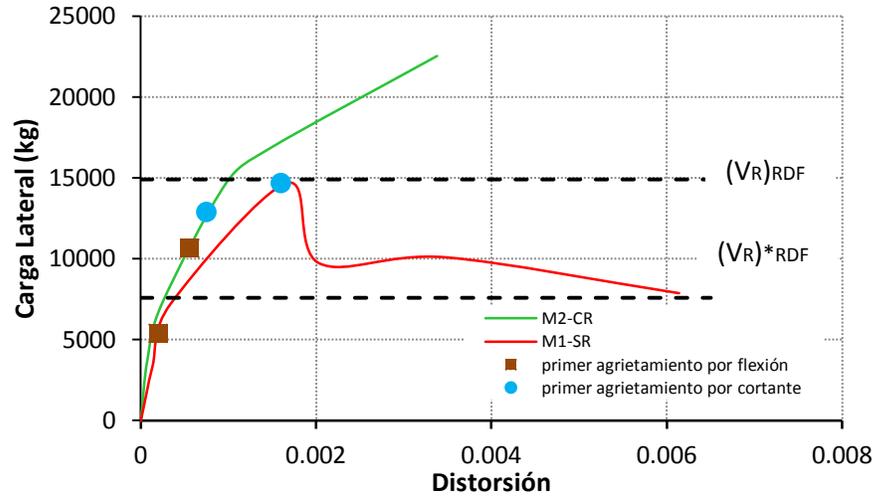


Figura 5.3. Comparación Grafica de ambos especímenes.

Tabla 5.1. Resistencia a carga lateral y distorsiones correspondientes.

MURO	V_{agr} (kg)	V_{max} (kg)	$(V_R)^*RDF$ (kg)	$(V_R)RDF$ (kg)	R_{agr} (kg)	R_{max} (kg)
M1-SR	14,685	14,685	7,582	14,890	0.0016	0.0016
M2-CR	12,896	22,508	7,582	14,890	0.0006	0.0034

Tabla 5.2. Relación entre las resistencias de cada muro.

MURO	V_{max} / V_{agr}	$V_{agr} / (V_R)^*RDF$	$V_{agr} / (V_R)RDF$	$(V_R)^*RDF / V_{max}$	$(V_R)RDF / V_{max}$	R_{max} / R_{agr}
M1-SR	1	1.94	0.99	0.52	1.01	1
M2-CR	1.75	1.70	0.87	0.34	0.66	5.67

De la tabla 5.2 se puede deducir que para el muro M1-SR la carga máxima es igual a la carga de agrietamiento, que la carga de agrietamiento fue 94% mayor que la carga agrietamiento calculada con el valor de diseño y 1% menor a la calculada con la resistencia a compresión diagonal promedio. De igual manera se observa que la carga de agrietamiento de diseño fue 48% menor que la carga máxima, mientras que la carga de diseño calculada con los valores a compresión diagonal promedio fue 1% mayor que la carga máxima. Se puede concluir que una vez agrietado el muro, este ya no tubo mayor capacidad carga.

En la tabla 5.2, se observa que para el muro M2-CR la carga máxima fue 75% mayor a la carga de agrietamiento y que la distorsión asociada a la carga máxima fue 5.67 veces la distorsión asociada a la carga de agrietamiento. La carga de agrietamiento fue 70% mayor que la carga de carga de diseño, y 13% menor que la carga calculada con los valores a compresión diagonal promedio. Por otro lado, la carga de diseño fue 66% menor a la carga máxima y la promedio 34 % menor que la carga máxima.

En la tabla 5.3 se muestra las relaciones encontradas entre resistencias a carga lateral y distorsiones del muro no reforzado respecto resistencias a carga lateral y distorsiones del muro reforzado.

Tabla 5.3. Relación entre las resistencias y distorsiones del muro no reforzado respecto al reforzado.

$(V_{agr})_{M2-CR} / (V_{agr})_{M1-SR}$	$(V_{max})_{M2-CR} / (V_{max})_{M1-SR}$	$(R_{agr})_{M2-CR} / (R_{agr})_{M1-SR}$	$(R_{max})_{M2-CR} / (R_{max})_{M1-SR}$
0.88	1.53	0.38	2.13

En la tabla 5.3 se observa que la carga de agrietamiento del muro reforzado con varillas de GFRP fue 12% menor que la del muro no reforzado, la carga máxima del muro reforzado fue 53% mayor la del muro no reforzado, la distorsión asociada a la carga de agrietamiento para el muro M2-CR fue 62% menor a la del muro M1-CR y que la distorsión asociada a la carga máxima fue 113% mayor la del muro reforzado respecto a la del muro sin refuerzo.

Se debe recordar que la carga máxima en la tablas 5.1, 5.2 y 5.3 para el muro M2-CR, es suponiendo que a partir de ese punto el muro empezaría a tener una disminución en su resistencia a carga lateral.

2.- Rigidez

Al igual que la resistencia, la rigidez de las estructuras es un parámetro muy importante para el estudio del comportamiento de las mismas, sobre todo

ante acciones sísmicas. En esta sección se presentan la comparación de la rigidez inicial, la rigidez de ciclo y la rigidez equivalente de los muros con los valores registrados experimentalmente.

En general, la rigidez de una estructura es un parámetro que depende de las propiedades geométricas de los elementos que integran la estructura así como de las propiedades mecánicas de los materiales con que se ha construido. Comúnmente, la rigidez inicial de los muros de mampostería confinada se calcula a través de un análisis elástico en el que se involucran las propiedades geométricas nominales y las propiedades mecánicas de los materiales (Aguilar et al., 2001).

- Degradación de la Rigidez

La degradación de la rigidez en una estructura se asocia al aumento de la distorsión y al nivel de daño ocasionado. Entre los parámetros que se pueden utilizar para describir la degradación de la rigidez de una estructura esta la rigidez del ciclo, que permite evaluar la pérdida de rigidez en ciclos completos de carga. Por otro lado esta la rigidez equivalente, la cual evalúa la pérdida de rigidez de cada semiciclo de carga, es decir ciclos positivos y ciclos negativos de carga.

En esta investigación analizaremos la rigidez de ciclo, que esta definido como la pendiente de la secante que une los picos de los semiciclos en un ciclo histerético, tal como se muestra en la figura 5.4, de esta manera queda definido por:

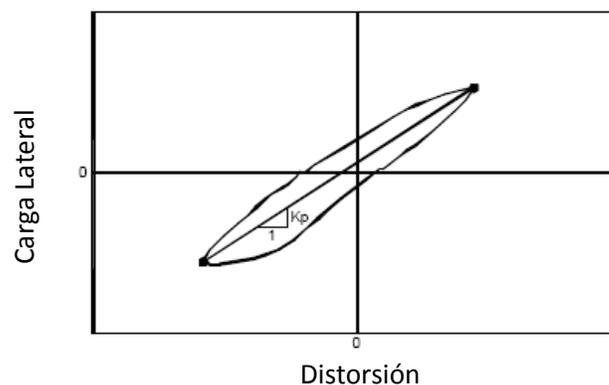


Figura 5.4 Definición de rigidez del ciclo.

Donde:

- Kp = rigidez del ciclo,
- = fuerza cortante máxima en el semiciclo positivo,
- = fuerza cortante máxima en el semiciclo negativo,
- =Distorsión correspondiente a V+,
- =Distorsión correspondiente a V⁻.

Las rigideces iniciales obtenidas experimentalmente fueron: para el muro no reforzado $K_{M1-SR} = 10.94 \text{ ton/mm}$ y para el muro reforzado $K_{M2-CR} = 19.66 \text{ ton/cm}$. En la figura 5.5 se muestra las curvas distorsión promedio de cada ciclo contra la rigidez de ciclo para ambos muros, se observa que la rigidez inicial del muro M2-CR fue 79% mayor que la rigidez inicial del muro M1-SR. Se puede apreciar que en todo momento la rigidez del muro M2-CR estuvo por encima de la del muro M1-SR para un mismo nivel de distorsión. Por otro lado, podemos ver que la mayor degradación de la rigidez en ambos muros se presento para distorsiones pequeñas, esto se atribuye a microagrietamientos iniciales por flexión en los castillos y al reacomodo de las unidades. En la figura 5.6 se observan las misma curvas de degradación de la rigidez pero ahora normalizadas respecto a sus rigideces iniciales.

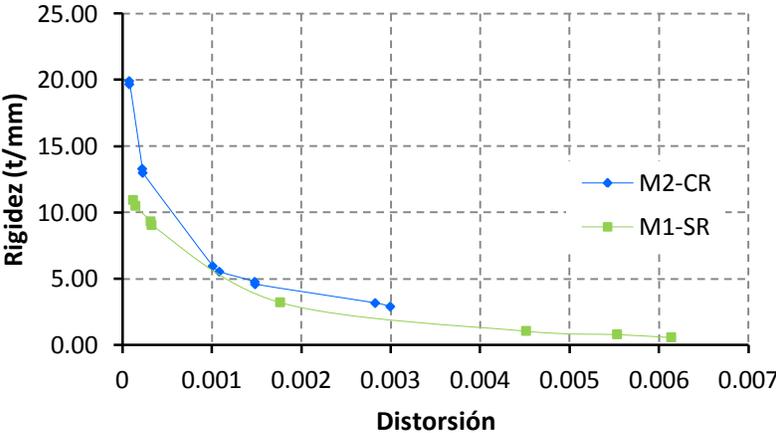


Figura 5.5. Comparación de la degradación de la rigidez para ambos muros.

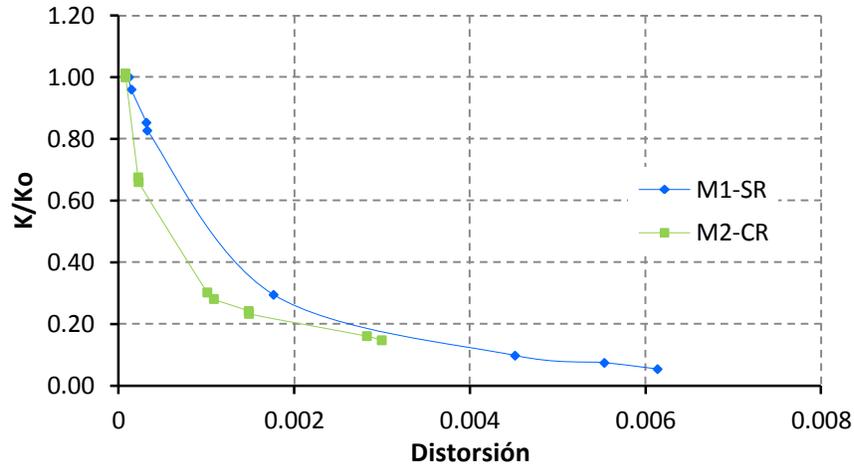


Figura 5.6. Degradación de las rigideces normalizadas.

Podemos concluir de la figura 5.5 y 5.6 que para una distorsión de 0.2% el muro M1-SR se había perdido el 73 % de su rigidez inicial mientras que el muro M2-CR, para este mismo nivel de distorsión había perdido el 79%, pero aun así, el muro reforzado siempre tubo mayor rigidez que el no reforzado para mismos niveles de distorsión.

3.- Energía Disipada

La energía disipada por una estructura se puede obtener a partir de su curva histerética carga lateral-deformación, como el área cuyo perímetro está definido por los lazos histeréticos. La disipación de energía en la forma anterior, conocida como amortiguamiento histerético, generalmente crece al aumentar el desplazamiento lateral de la estructura, ya que el límite elástico del comportamiento de los materiales es superado y se presentan deformaciones permanentes asociadas al agrietamiento de las piezas y de los elementos confinantes (Aguilar et al., 2001).

La energía disipada por los muros se acumuló ciclo a ciclo mediante la suma de las áreas encerradas por los lazos histeréticos de la curva carga lateral-deformación (figura 5.7).

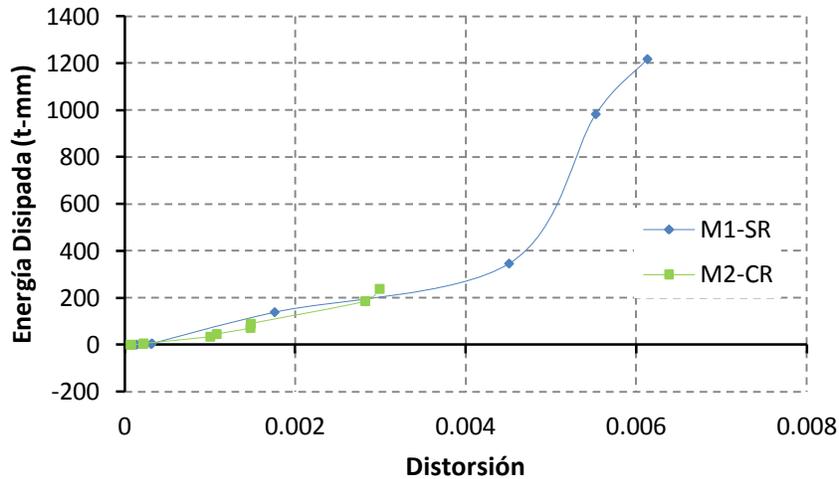


Figura 5.7. Energía disipada acumulada de los muros.

En la figura 5.7, se observa que la energía disipada fue muy cercana a cero durante el rango elástico para ambos muros y la disipación de energía fue prácticamente la misma hasta antes de parar el ensaye del espécimen M2-CR.

4.- Energía Disipada Equivalente

La energía disipada equivalente equivalentes de cálculo según las NTCMRCDF 2004 (figura 5.8). La energía disipada equivalente del muro M1-SR fue de 0.43, mientras que la del muro M2-CR resulto de 0.10, quedando por debajo de las especificaciones de la norma antes mencionada. En la figura 5.9 se muestran los esquemas de la energía disipada equivalente de ambos muros.

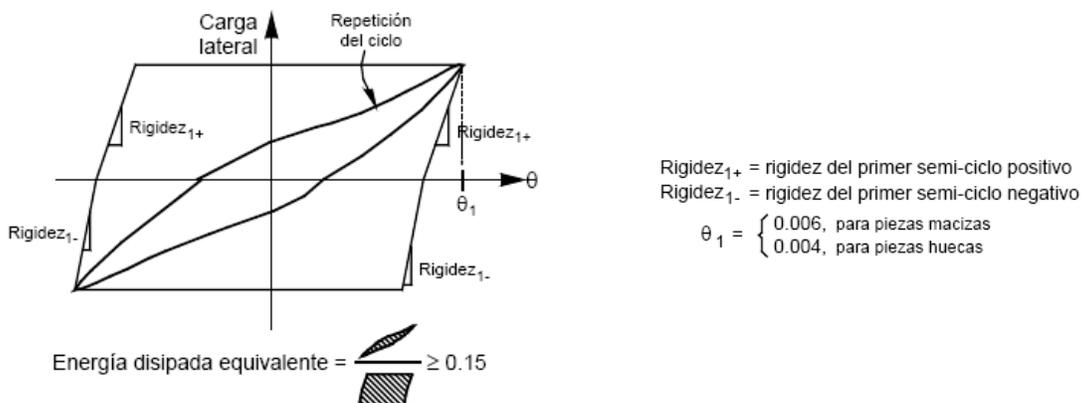
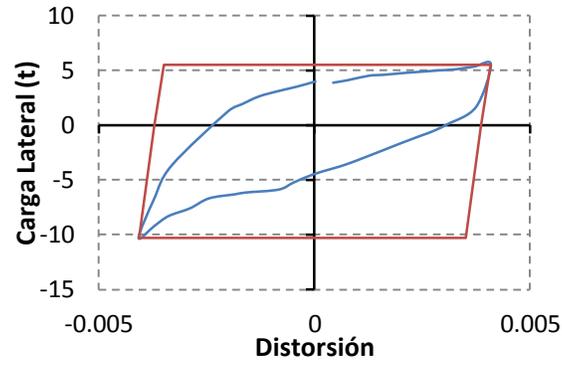
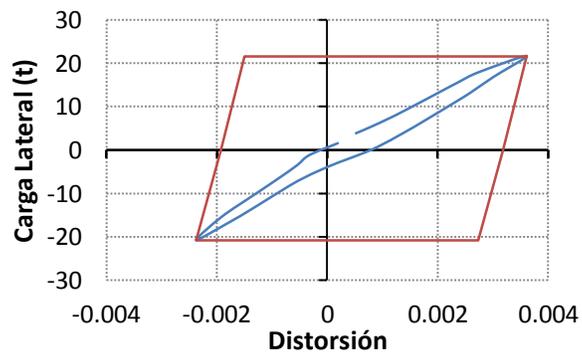


Figura 5.8. Definición de energía disipada equivalente (NTCMRCDF 2004).



a) Muro M1-SR



b) Muro M2-CR

Figura 5.9. Energía Disipada Equivalente de los muros.

VI. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de dos muros de block de dimensiones y propiedades mecánicas similares sujetos a cargas cíclicas reversibles en el plano y a carga axial constante. Uno de los muros ensayados se reforzó con varillas de GFRP colocadas en las juntas horizontales, cubriendo 1m de las diagonales de este. Para evaluar la contribución del GFRP como material de refuerzo se compararon parámetros como carga de agrietamiento, carga lateral máxima soportada, degradación de la rigidez, energía disipada y principalmente a su respuesta de deformación ante la aplicación de la carga lateral. Es de esta manera que a partir de análisis de los resultados, se pueden plantear las siguientes conclusiones:

- El refuerzo de GFRP no contribuye a mejorar la carga al primer agrietamiento, dichas cargas fueron superiores a la de diseño propuesta por las NTCMRCDF.
- La resistencia máxima del muro con refuerzo fue 1.53 veces la del muro no reforzado.
- La rigidez del muro reforzado con GFRP estuvo siempre por encima de la rigidez del muro no reforzado.
- El daño en el muro reforzado con GFRP fue significativamente menor, esto debido a que presentaba menores espesores de grieta para el mismo nivel de distorsión.
- La colocación de varillas de GFRP aumentó considerablemente la rigidez inicial del muro reforzado comparado con el muro no reforzado.
- La energía disipada de ambos muros fue similar hasta distorsión de 0.004, donde se suspendió la prueba en el muro M2-CR.

- La energía disipada equivalente del muro reforzado estuvo por debajo de la recomendada por las NTCMRCDF, mientras que el muro reforzado si cumplió con esta normatividad.
- El procedimiento utilizado y propuesto para reforzar el muro con materiales compuestos es eficiente, sencillo de aplicar y no requiere de mano de obra especializada. Es adecuado para ser utilizado como elemento de refuerzo preventivo y también en edificaciones históricas, ya que este no cambia la apariencia inicial del elemento a reforzar.

RECOMENDACIONES

Los resultados de este trabajo indican que el refuerzo con varillas de GFRP, mejoran sustancialmente el comportamiento mecánico de los muros de mampostería sujetos a fuerzas laterales, sin embargo es necesario ampliar y profundizar su estudio en aspectos tales como:

- Continuar la experimentación de muros de mampostería con varillas de GFRP de diferente longitud, y así optimizar su implementación.
- Realizar el análisis numérico para la modelación de muros de mampostería con diferentes tipos de refuerzo.
- Estudiar la factibilidad del uso de materiales compuestos (GFRP) en la rehabilitación de muros de mampostería.
- Llevar a cabo pruebas de adherencia de las varillas de GFRP con la mampostería, para encontrar la longitud de desarrollo y optimizar este material en técnicas de refuerzo y/o rehabilitación.

LITERATURA CITADA

- Aguilar, G. y Alcocer, S.M. 2001. Efecto Del Refuerzo Horizontal En El Comportamiento De Muros De Mampostería Confinada Ante Cargas Laterales. Informes Técnicos, Dirección de Investigación, Subdirección de Estructuras y Geotecnia, CENAPRED.
- Aguilar, G., Cano, G., y Alcocer, S.M.1994. Efecto del Refuerzo Horizontal en el Comportamiento de Muros de Mampostería ante Cargas Laterales. Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Zacatecas, Zac., México, octubre - noviembre, 1994, pp. 66-74.
- Alcocer, S.M., Meli, R., Sánchez, T.A., y Flores, L.E., 1994a “Comportamiento ante Cargas Laterales de Sistemas de Muros de Mampostería Confinada con Diferentes Grados de Acoplamiento a Flexión. Cuaderno de Investigación, CENAPRED, No. 17, julio de 1994, pp. 53-76.
- Alcocer, S.M., Meli, R., Sánchez, T.A., Vázquez del Mercado, R., y Díaz, R.R., 1994b. Comportamiento ante Cargas Laterales de Sistemas de Muros de Mampostería Confinada con Distintos Tipos de Refuerzo Horizontal. Cuaderno de Investigación, CENAPRED, No. 17, julio de 1994, pp. 77-94.
- Astroza, M. y Ogaz O., 2005. “Ensayo de Muros de Albañilería Confinada de Ladrillo cerámico con Aberturas”, Memorias del Congreso Chileno de Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas, Concepción, Chile.
- Bajpai, K. y Duthinh, D. 2003. Bending performance of masonry walls strengthened with near-surface mounted frp bars. North American Masonry Conference. Clemson, South Carolina, USA.
- Campbell J., M. Durán L., L. Díaz Z., A. Aguilera C. y C. San Francisco V. 2005. Ensayos De Muros De Albañilería Armada Dañados Y Reparados Sometidos A Carga Horizontal Dinámica. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica.
- Departamento del Distrito Federal. 1989. Normas Técnicas Complementarias Para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. Gaceta Oficial del Departamento del D. F., marzo de 1989, 19 pp.
- Departamento del distrito federal. 2001. Normas técnicas complementarias del reglamento de construcción para el distrito federal. Berbera editores, México: 604 pág.
- Díaz-Infante Ch., L.A. 1993. Estadísticas de Propiedades Estructurales de Conjuntos Habitacionales de Interés Social. Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, 136 pp.

- ElGawady, M., Lestuzzi, P., Badoux, M. 2004. A review of retrofitting of URM walls using composites, 4th Int. Conf. Adv. Comp. Mat. Bridges and Struc., Calgary, Canada
- ElGawady, M. Lestuzzi, P., Badoux, M. 2007. Static Cyclic Response of Masonry Walls Retrofitted with Fiber-Reinforced Polymers. Journal of Composites for Construction © asce, february 2007.
- Eshani, M.R., Saadatmanesh, H. y Al-Saidy, A. 1997. Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlay. Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 1, No.1, February, pp. 17-25.
- Flores, Leonardo E., Jaime Marcelino, Gustavo Lazalde y Sergio M. Alcocer. 1999. Evaluación experimental del desempeño de marcos con bloque hueco de concreto reforzados con malla electrosoldada y recubrimiento de concreto. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), Informe preparado para AC-TELMEX, Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia, Octubre de 1999.
- Flores, Leonardo E. y Alcocer, Sergio M. 2001. Estudio Analítico De Estructuras de Mampostería Confinada. Informes Técnicos, Dirección de Investigación, Subdirección de Estructuras y Geotecnia, CENAPRED.
- Flores, L.E., Mendoza, J.A. y Reyes C. 2004. Ensaye De Muros De Mampostería Con Y Sin Refuerzo Alrededor De La Abertura, Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro., octubre 29 a noviembre 1.
- Flores, Leonardo E., Sergio M. Alcocer Martínez de Castro, Julián Carrillo León, Alfredo Sánchez Alejandro, Roberto Uribe y Ángel Ponce. 2007. Ensaye De Muros De Concreto Con Diferente Relación De Aspecto Y Bajas Cuantías De Refuerzo, Para Uso En Vivienda. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa Zihuatanejo, Guerrero, 2007.
- Griffith, M.C., Kashyap, J., Mohamed Ali, M.S. 2007. Flexural displacement response of NSM FRP retrofitted masonry walls. Constr Build Mater, article in press, Elsevier Ltd.
- Hernández, O. 2003. Modalidades de refuerzo de la Mampostería en México. ICA, capítulo 5.
- Li, T., Galati, N., Tumialan, J.G., Nanni, A. 2005. Analysis of unreinforced Masonry Concrete Walls Strengthened with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars. ACI Structural Journal, V. 102, No. 4, July-August 2005.
- Loaiza, J.M., 2008. Reparación de un Muro de Albañilería Confinada mediante varillas de Fibra de Vidrio. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero

Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica Del Perú, Lima, Perú.

Lunn, D.S., Rizkalla, S.H., Maeda, S., Ueda, T. 2012. FRP Anchorage Systems for Infill Masonry Structures. The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS2012).

Meli, R. 1975. Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería. Serie No. 352, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F., abril de 1975, 114 pp.

Meli R. 1979. Comportamiento sísmico de muros de mampostería. 2ª edición, Informe No. 352, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, mayo, 141.

Meli, R., Alcocer, S.M., y Díaz-Infante Ch., L.A. 1994. Características Estructurales de la Vivienda de Interés Social en México, Cuaderno de Investigación, CENAPRED, No. 17, julio de 1994, pp. 25-52.

NMX-C-036-ONNCCE-2004, "Industria de la construcción- bloques, tabiques o ladrillos, tabicones o adoquines-resistencia a la compresión-método de prueba"., organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C., México.

NMX-C-037-ONNCCE-2005, "Industria de la construcción - Bloques, ladrillos o tabiques y tabicones – Determinación de la absorción de agua y absorción máxima inicial de agua"., organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C., México.

NMX-C-038-ONNCCE-2004, "Determinación de las dimensiones de ladrillos y bloques para la construcción.". , organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C., México.

NMX-C-061-ONNCCE-2001, "Industria de la construcción – Cemento – Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos"., organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C., México.

NMX-C-404-ONNCCE-2004. Mampostería - Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo. Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C., México.

NMX-C-464-ONNCCE-2010, "Industria de la construcción-determinación de la resistencia a la tensión diagonal y rigidez al cortante del muretes y la resistencia a la compresión y modulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro o de concreto-metodo de ensayo", organismo nacional de normalización de la construcción y edificación, S.C., México.

- Páez Moreno, D., Parra Rojas, S., Montoya Gutiérrez, C. 2009. Alternativa Estructural De Refuerzo Horizontal En Muros De Mampostería. Revista de Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 8, Núm. 14, enero-junio, 2009, pp. 51-69 Universidad de Medellín Colombia.
- Pineda, J.A. y Alcocer, Sergio M. 2004. Comportamiento Ante Cargas Laterales De Muros De Mampostería Confinada Reforzados Con Malla De Alambre Soldado. Informes Técnicos, Dirección de Investigación, Subdirección de Estructuras y Geotecnia, CENAPRED.
- Quiñónez, B. 2007. Comportamiento de Muros de Mampostería Reforzados con Materiales Compuestos, Sujetos a Carga en el Plano. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UAS.
- Reyes A. J.L., Manzano R. A., Ramirez J.R., Arroyo C.M., Rubio A., J.C., Perez L., M.A., Bernal E., F.V. 2008. Resistencia a cortante de la mampostería de tabique reforzada con varillas de polímero fibro-reforzado. Artículo publicado en el cuarto congreso de ingeniería, UAQ.
- Robles F., González O. y Meli R. 1984. Apuntes de mecánica de materiales, Primer curso, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Rodriguez, M. E. 2004. Un enfoque alternativo para la evaluación y diseño de edificaciones de mampostería en zonas sísmicas. Revista de ingeniería sísmica: 27-58.
- Tena, A. 2001. Diseño de Estructuras de Mampostería, apuntes del curso dictado en la Maestría en Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco y en el Posgrado de Ingeniería de la UNAM, sexta actualización.
- Tena, A. y Miranda, E. 2003. Comportamiento mecánico de la mampostería. ICA, capítulo 4.
- Tena, A., Juárez, A, y Salinas, V.H. 2007. Resistencia Y Deformación De Muros De Mampostería Combinada Y Confinada Sujetos A Cargas Laterales. Revista de Ingeniería Sísmica No. 76 29-60 (2007)
- Tumialan, G., Huang, p., Nanni, A y Silva, P. 2001. Strengthening of Masonry Walls With FRP Structural Repointing. prec. 5th. Int. Conf. On Fibre Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, Thomas Telford, Cambridge, U.K. pp. 1033-1042.
- Tumialan, J.G y Nanni, A. 2002 Strengthening of Masonry Walls with FRP Bars. Composites Fabricator Magazine, March 2002, Arlington, VA
- Tumialan, J.G., San Bartolomé, A. y Nanni, A. 2004. Comportamiento sísmico de tabiques reforzados con varillas de fibra de vidrio. El ingeniero civil, Revista de

información profesional a nivel nacional e internacional, pontificia universidad católica de Perú, No 134, pp 6-10.

Turco, V., Secondin, A., Morbin, A., Valluzzi, M.R., Modena, C. 2006. Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars. *Journal of Composites Science and Technology* 66 (2006) 289–296. Elsevier Ltd.

Vasconcelos, D. y Sánchez, T. 2003. Materiales y sistemas constructivos para vivienda de interés social. ICA, capítulo 3.

Velázquez, J.I., Quiñónez B. 2010. Estudio Experimental De Muros De Mampostería De Block Con Abertura Sujetos A Carga Cíclica En El Plano, Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León, Gto.

Velázquez, J.I., Quiñónez B., Reyes, A. y Leyva, G. 2007. Comportamiento ante Cargas Laterales de Muros de Mampostería Rehabilitados con GFRP. Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.

APÉNDICE A

Para poder conocer las propiedades de los materiales utilizados en la construcción y refuerzo de los muros, se muestrearon y ensayaron tanto los materiales, así como, la mampostería, es decir, se determinaron parámetros como la resistencia a compresión del mortero, la resistencia a compresión diagonal de la mampostería y de las varillas de GFRP utilizadas en el refuerzo del muro. Por otro lado a las piezas se les determino su absorción inicial y su absorción total.

Piezas

Para la construcción de los muros se utilizo bloc hueco de concreto con dimensiones nominales 12cm x 20cm x 40cm, a las piezas de block individuales se les determino el peso volumétrico, la absorción inicial y la absorción total de acuerdo a las normas correspondientes NMX-C-ONNCCE. En la tabla A.1 se muestran los valores de los parámetros obtenidos, el coeficiente de variación y la norma aplicada. El coeficiente de variación calculado en las dimensiones de las piezas se obtuvo en base a las dimensiones de las piezas. En la figura A1 se muestran la ejecución de los ensayos.

Tabla A.1. Propiedades físicas y mecánicas de las piezas.

PROPIEDAD	VALOR PROMEDIO.	CV	NORMA
Dimensiones (lxbxh) (cm)	39.72x11.81x19.48	0.007	NMX-C-038-ONNCCE
Peso volumétrico (kg/m ³)	1192.28	0.017	NMX-C-404-ONNCCE
Absorción inicial. (gr/min)			NMX-C-307-ONNCCE
Absorción total (%)	7.45	0.09	NMX-C-037-ONNCCE



Figura A.1. Ensaye de absorción inicial y total de las piezas.

Mortero

El mortero empleado para unir las piezas de barro de los muros, pilas y muretes fue proporcionado con una relación volumétrica cemento:arena 1:2.1, el agua de la mezcla fue agregada hasta lograr buena trabajabilidad. Para determinar la resistencia del mortero utilizado se elaboraron nueve series de tres cubos con dimensiones nominales de 5x5x5 cm, obtenidas de cada bachada de mortero que se realizo para la construcción de pilas, muretes y muros.

Las muestras fueron elaboradas y ensayadas según la norma NMX-C-061. Los resultados obtenidos en los ensayos de las muestras de mortero se presentan en las Tablas A.2. Cada valor mostrado corresponde al promedio del resultado del ensaye de tres especímenes. En la Figura A2 se muestra el ensaye de un espécimen de mortero.

Tabla A.2. Resultado de los ensayos a compresión del mortero.

MURO	M1-SR				M2-CR		
Resistencia kg/cm ²	190.5	183.6	164.9	112.2	180.6	143.3	152.6
Promedio kg/cm ²	162.8				158.83		
CV(%)	22				12		



Figura A.2. Cubos y ensaye del mortero.

Mampostería

Para la determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de rigidez de al corte es necesario la construcción de muretes. El primer parámetro es necesario para estimar la carga a resistencia lateral de los muros. Los muretes fueron elaborados simultáneamente a la construcción de los muros, sus dimensiones eran aproximadamente cuadrados y constaban de tres hiladas con una y medio block cada una, en total se construyeron cinco muretes. El ensaye de los muretes se hizo de acuerdo a las recomendaciones de la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 (Figura A.3).

A los muretes se les aplico carga compresión monótona a lo largo de su diagonal y el esfuerzo cortante medio se determinará dividiendo la carga máxima entre el área bruta del murete medida sobre la misma diagonal.

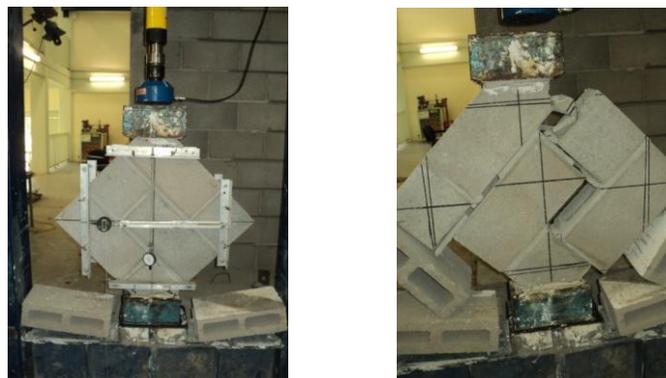


Figura A.3. Instrumentación y ensaye de muretes.

La resistencia de diseño a compresión diagonal, v_m^* , es igual a:

$$\frac{V_m}{C_v} \dots\dots\dots 7$$

donde: V_m la resistencia a tensión diagonal promedio de los muretes ensayados.
 C_v coeficiente de variación de la resistencia a compresión diagonal de muretes, que en ningún caso se tomará inferior a 0.20.

El módulo de rigidez al cortante de la mampostería se calcula con:

$$\frac{1}{\gamma_2} \dots\dots\dots 8$$

donde:

γ_2 es la deformación angular producida por τ_2 .

τ_1 es el esfuerzo cortante correspondiente a 0.00005 de deformación angular.

τ_2 es el esfuerzo cortante correspondiente al 40% de la carga máxima.

La deformación angular se calcula como:

$$\frac{\delta_c - \delta_t}{l_{oc} - l_{ot}} \dots\dots\dots 9$$

donde:

ϵ_c es la deformación de la diagonal en compresión, ()

ϵ_t es la deformación de la diagonal en tensión, ().

l_{oc} es la longitud calibrada de la diagonal en compresión

l_{ot} es la longitud calibrada de la diagonal en tensión

δ_c es el acortamiento medido sobre la longitud calibrada de la diagonal en tensión

δ_t es el acortamiento medido sobre la longitud calibrada de la diagonal en compresión.

En la Tabla A.3 se presentan los valores obtenidos en los ensayos de muretes.

Tabla A.3. Resultado de los ensayos a compresión diagonal de la mampostería.

Murete	M1	M2	M3	M4	M5
Vm (kg/cm ²)	6.24	5.99	4.80	7.53	7.74
(Vm) _{prom}	6.46				
CV	0.2				
Vm*	4.31				
Gm (kg/cm ²)	12738				

Varillas de GFRP

Para reforzar el muro M2-CR se utilizó varillas de GFRP con diámetro nominal de 0.9 cm, se tomaron 3 probetas de 60 cm para determinar su resistencia a tensión y su resistencia y su módulo de elasticidad. La resistencia a la tensión fue calculada al dividir la carga máxima entre el área original de la sección transversal mínima, además, el esfuerzo y la deformación última fueron medidas antes de que la varilla se rompiera. El cálculo del módulo elástico se hizo en base a las deformaciones medidas. En la figura A.4 se muestra el ensaye las varillas de GFRP y en la Tabla A.4 se muestran los valores obtenidos en los ensayos de las varillas de GFRP.



Figura A.4. Ensayo de las varillas de GFRP.

Tabla A.4. Resultado de los ensayos tensión de las varillas de GFRP.

Varilla de GFRP	V1	V2	V3
Esfuerzo (kg/cm ²)	8345.8	8376.5	8900.8
Promedio	8541.1		
Modulo Elastico (Ef)	358 940 (kg/cm ²)		