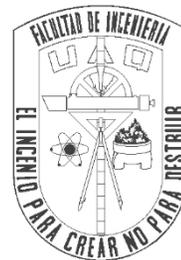




Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería Civil



**“MODELO EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA A CORTANTE DE MUROS
DE MAMPOSTERÍA REFORZADOS CON MALLAS METÁLICAS”**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de

Ingeniero Civil

Presenta:

Luis Francisco Pérez Moreno

Dirigido por:

M. en C. José Carlos Sotero Mendoza Pérez

M. en C. José Carlos Sotero Mendoza Pérez
Presidente

Dr. Enrique Rico García
Secretario

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Vocal

M. en I. Rubén Ramírez Jiménez
Suplente

Firma

Firma

Firma

Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2015

RESUMEN

La mampostería es el material más utilizado para la construcción de vivienda en México, sin embargo, su desempeño ante acciones producidas por fenómenos naturales como sismos, que inducen esfuerzos cortantes, ha tenido como consecuencia que no se aprovechen al máximo sus propiedades como material estructural. A pesar de que las estructuras de mampostería son las más frecuentes en el campo laboral del ingeniero civil, la variabilidad de sus propiedades hace difícil encontrar métodos de análisis y diseño con los que se puedan obtener predicciones más certeras, debido a esto, las normas adoptan relaciones semiempíricas y criterios basados en principios muy simples comparados a los utilizados en otros materiales. El encamisado de muros de mampostería con mallas metálicas es una técnica de rehabilitación y refuerzo que ha sido evaluada en diversos estudios con muy buenos resultados. Esta investigación tuvo como principal objetivo plantear una expresión para calcular la resistencia a esfuerzos cortantes, tomando en cuenta la resistencia del muro, la contribución del mortero de recubrimiento y el acero de refuerzo horizontal y vertical (proporcionado por la colocación de mallas metálicas). Se obtuvo una base de datos de las propiedades de piezas de tabicón y block de concreto ligero, haciendo una comparación con los valores especificados en las normas correspondientes. Para la realización del trabajo experimental se hicieron pruebas en seis muros de mampostería confinada de 2.5 x 2.5 m, sometidos a carga axial y lateral cíclica, construidos con los dos tipos de pieza, siguiendo el procedimiento marcado por las NTC-RCDF-2004. El primer par de especímenes ensayados fueron muros testigo sin refuerzo, los cuales fueron rehabilitados con multimalla ferretera simétrica de 5 x 5 cm y recubrimiento de mortero de 2 cm, posteriormente se construyeron dos muros que fueron reforzados con el mismo tipo de malla metálica y recubrimiento. A partir de las curvas de histéresis de los muros, se trazaron las envolventes de respuesta, haciendo una comparación de su comportamiento. Las predicciones teóricas obtenidas con la ecuación propuesta se validaron con los resultados de las pruebas realizadas en los muros de tamaño real y con datos recabados de otras investigaciones.

(Palabras clave: modelo experimental, muros de mampostería, mallas metálicas, esfuerzo cortante)

SUMMARY

The masonry is the most widely used material for the construction of housing in Mexico, however, its performance against actions produced by natural phenomena such as earthquakes, which induce shear forces, has resulted in not take maximum advantage of its properties as a structural material. Although masonry structures are the most common in the workplace of civil engineer, the variability of its properties makes difficult to find methods of analysis and design with which we can obtain more accurate predictions, because of this, the standards adopted semiempirical relationships and criteria based on very simple principles compared to the used in other materials. The colocation of metallic mesh in masonry walls is a rehabilitation and reinforcement technique that has been assessed in several studies with very good results. This research had as main objective to obtain an expression to calculate the shear strength, taking into account the strength of the wall, the contribution of the mortar cover and the horizontal and vertical steel reinforcement (provided by the placing of metallic mesh). A database of properties of masonry pieces was obtained, making a comparison with the values specified in the corresponding standards. Experimental tests were conducted on six confined masonry walls subjected to constant axial load and in-plane reversible cyclic loading, built with two types of piece, following the procedure set by the NTC-RCDF-2004. The first couple of specimens tested were unreinforced walls, which were rehabilitated with symmetric metallic mesh and mortar cover, then two walls were constructed and reinforced with the same type of wire mesh and mortar. From the hysteresis curves of the six walls, curve line envelopes were drawn, making a comparison of their behavior. Theoretical predictions obtained with the equation proposed were validated with the results of tests conducted on the walls and data collected from other research.

(Key words: experimental model, masonry walls, metallic mesh, shear forces)

DEDICATORIAS

A mis padres

Francisco Pérez García y Marisela Moreno Ramos, por el apoyo y la confianza que siempre me han brindado. A lo largo de mi vida han sido un gran ejemplo para mí, inculcándome la constancia y la dedicación como medios para alcanzar mis metas.

A mi hermana

Sandra Pamela Pérez Moreno, sin ti mi vida hubiera sido totalmente distinta, siempre tienes la capacidad para hacerme reír con tus ocurrencias, aun en los momentos más difíciles.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, M. en C. José Carlos Sotero Mendoza Pérez, por compartir conmigo su amplio conocimiento sobre el tema y por sus consejos durante la realización del proyecto.

A mis sinodales, Dr. Enrique Rico García, Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras y M. en I. Rubén Ramírez Jiménez, por sus observaciones y el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo.

A la Dra. Ma. De la Luz Pérez Rea, en seminario de integración de proyectos inicié con esta investigación, le agradezco sus comentarios y las correcciones realizadas a mi protocolo.

A mis maestros, por sus enseñanzas a lo largo de estos cuatro años que estuve en la facultad, en especial a:

M. en I. Felipe Jesús Zepeda Garrido

M. en C. Patricia Isabel Spíndola Yáñez

M. en I. Jaime Alvarado Balleza

Dr. Omar Chávez Alegría

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Dr. Eduardo Rojas González

Ing. José Álvaro Ugalde Ríos

Dr. Eduardo Álvarez Mendiola

Dr. Alfredo Pérez García

Ing. Mauricio Osorio Villaseñor

M.G.P.A. José Luis Alcántara Obregón

M.D.M. Agustín Pacheco Cárdenas

“Si he logrado ver más lejos, ha sido porque me he subido a hombros de gigantes”

Sir Isaac Newton

A mis amigos,

Edgar Arturo Rivera Olvera y Jesús Alejandro Romero Vázquez, después tantos años de amistad sigo agradecido con el destino por haberlos puesto en mi camino.

Marisol Sánchez Becerril, una parte muy importante de mi vida, por nada cambiaría todo lo que he vivido y aprendido contigo desde que nos conocimos.

Anabel Morales Morales, Hugo Emanuel Franco Hernández, Iván Almaraz Sánchez, Fernando Sánchez Pérez, por ser de esos amigos que aunque no siempre los ves, sabes que puedes contar con ellos en todo momento.

Jaime Alberto Arteaga Vargas y Abraham Reséndiz Olvera, por su valiosa amistad durante nuestros estudios de licenciatura, nunca faltó un motivo para reírnos.

Itzel Arreola Ruiz, Bibiana Quiterio Mendoza, Nohemí Mojica Pérez, Jonathan Maya Rangel, José María Alan Vega Saavedra, Luis Alberto Camacho Bautista, Héctor Iván Martínez Olvera, Ernesto Polo Vergara, Juan Manuel Martínez Rivera y José María Reyes Retana Tamayo, por estos cuatro años que compartimos en las aulas.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.2 MATERIALES.....	2
1.2.1 Piezas de mampostería.....	3
1.2.2 Morteros.....	6
1.2.3 Acero de refuerzo.....	9
1.3 TIPOS DE MUROS.....	10
1.3.1 Muros diafragma.....	10
1.3.2 Muros confinados.....	11
1.3.3 Muros reforzados interiormente.....	13
1.4 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA MAMPOSTERÍA.....	15
1.4.1 Resistencia a compresión de piezas de mampostería.....	15
1.4.2 Resistencia a compresión del mortero.....	16
1.4.3 Resistencia a compresión de pilas.....	17
1.4.4 Módulo de elasticidad.....	20
1.4.5 Resistencia a compresión diagonal.....	20
1.4.6 Módulo de rigidez a cortante.....	22
1.5 REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA.....	23
1.5.1 Evaluación y análisis de estructuras de mampostería existentes.....	24
1.5.2 Técnicas de evaluación y ensayos en el sitio de estructuras de mampostería.....	26
1.5.3 Técnicas de rehabilitación.....	27
2. ANTECEDENTES	37
2.1 TRABAJOS PREVIOS.....	37
2.1.1 Pruebas experimentales.....	37
2.1.2 Modelos.....	42
2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	44
2.3 OBJETIVOS.....	45
2.3.1 Objetivo general.....	45
2.3.2 Objetivos particulares.....	45
2.4 HIPÓTESIS.....	45
3. METODOLOGÍA	46
3.1 PROPIEDADES DE LAS PIEZAS.....	46
3.1.1 Dimensiones de las piezas.....	47
3.1.2 Resistencia a la compresión.....	47
3.1.3 Absorción inicial.....	48

3.1.4	Absorción máxima a 24 horas	49
3.1.5	Módulo de ruptura.....	50
3.1.6	Peso volumétrico	51
3.2	PROPIEDADES DEL MORTERO DE PEGA	52
3.3	ENSAYE DE PILAS	53
3.4	ENSAYE DE MURETES	55
3.5	ENSAYE DE MUROS DE TAMAÑO REAL	58
3.5.1	Geometría de los muros	59
3.5.2	Armado de los muros.....	60
3.5.3	Construcción de los muros	60
3.5.4	Instrumentación	61
3.5.5	Dispositivo de aplicación de cargas	62
3.5.6	Historia de carga.....	64
3.6	PLANTEAMIENTO DEL MODELO PROPUESTO.....	65
3.7	VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO	65
3.7.1	Comparación con resultados de pruebas experimentales	65
3.7.2	Comparación con datos recabados de otras investigaciones	66
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
4.1	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	69
4.2	ENSAYE DE PILAS Y MURETES	73
4.3	ENSAYE DE MUROS TESTIGO SIN REFUERZO.....	75
4.4	ENSAYE DE MUROS TESTIGO REHABILITADOS	77
4.5	ENSAYE DE MUROS REFORZADOS.....	80
4.6	COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MUROS DE TAMAÑO REAL	82
4.7	PLANTEAMIENTO DEL MODELO PROPUESTO.....	86
4.8	VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO	92
4.8.1	Comparación con resultados de pruebas experimentales	92
4.8.2	Comparación con datos recabados de otras investigaciones	96
5.	CONCLUSIONES.....	102
	REFERENCIAS.....	104
	APÉNDICE A – PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	107
	APÉNDICE B – ENSAYE DE PILAS Y MURETES.....	114
	APÉNDICE C – CURVAS DE HISTÉRESIS	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Piezas huecas (NTC-RCDF-2004).	4
Figura 2. Piezas multiperforadas (NTC-RCDF-2004).	5
Figura 3. Mecánica de la adherencia entre piezas y mortero (Gallegos, 1989).	8
Figura 4. Interacción marco-muro diafragma (NTC-RCDF-2004).....	11
Figura 5. Requisitos para mampostería confinada (NTC-RCDF-2004).....	12
Figura 6. Castillos y dalas (NTC-RCDF-2004).....	12
Figura 7. Refuerzo en el perímetro de aberturas (NTC-RCDF-2004).....	13
Figura 8. Requisitos para mampostería con refuerzo interior (NTC-RCDF-2004).	14
Figura 9. Conectores entre muros sin traslape de piezas (NTC-RCDF-2004).	14
Figura 10. Refuerzo en aberturas y pretilas (NTC-RCDF-2004).	14
Figura 11. Pila para prueba en compresión (NTC-RCDF-2004).....	18
Figura 12. Mecánica típica de falla de la mampostería a compresión (Tena y Miranda, 2003).	19
Figura 13. Murete para prueba en compresión diagonal (NTC-RCDF-2004).....	21
Figura 14. Modos de falla en ensayos de compresión diagonal (Meli, 1979).....	22
Figura 15. Desempeño de un muro de mampostería existente, nivel de daño esperado y posibles esquemas de rehabilitación (Alcocer, 2003).	28
Figura 16. Técnicas para inyección de resinas en concreto agrietado (Alcocer, 2003).	29
Figura 17. Inserción de barras de refuerzo en las juntas de un muro (Alcocer, 2003).....	30
Figura 18. Colocación de grapas sobre grietas en muros de mampostería (Alcocer, 2003).....	31
Figura 19. Malla metálica anclada a un muro de mampostería con clavos (Alcocer, 2003).	32
Figura 20. Conectores Hilti tipo X-ZF y herramienta para colocación (Alcocer, 2003).....	33
Figura 21. Malla metálica anclada a un muro de mampostería con clavos Hilti (Alcocer, 2003).	33
Figura 22. Recubrimiento armado para rehabilitación de mampostería (de la Torre, 1995).	34

Figura 23. Confinamiento de un castillo con mallas metálicas que han sido traslapadas (Alcocer, 2003).	35
Figura 24. Agrietamiento de muro con abertura con recubrimiento de mortero (Lopes, 2001).....	37
Figura 25. Agrietamiento de muro con abertura sin refuerzo (Lopes, 2001).	37
Figura 26. Muro con malla metálica y anclajes distribuidos en el marco de concreto (Flores, 2003).	38
Figura 27. Agrietamiento del recubrimiento en muro con anclajes distribuidos en el marco (Flores, 2003).	38
Figura 28. Curva de histéresis y patrón final de daño (Flores et al., 2004).	39
Figura 29. Ensaye de muros de mampostería sujetos a carga lateral cíclica (Juárez, 2007).	39
Figura 30. Murete reforzado con multimalla ferretera (Alonso y Mendoza, 2012).....	40
Figura 31. Estado de daño en muro sin refuerzo (Flores et al., 2012).	41
Figura 32. Patrón de agrietamiento final en muro rehabilitado (Flores et al., 2012).....	41
Figura 33. Aparición de grietas durante el ensaye de muro construido con piezas de block de concreto ligero (Jaen, 2015).	41
Figura 34. Modelación de muro de mampostería sujeto a carga axial y lateral (Xu et al., 2011).....	42
Figura 35. Resultados obtenidos a partir de la modelación con elementos finitos y pruebas experimentales (Lizárraga y Pérez, 2012).	43
Figura 36. Predicciones teóricas comparadas con resultados experimentales en diferentes ciclos de carga (Psilla y Tassios, 2009).	43
Figura 37. Máquina universal utilizada para las pruebas en piezas, pilas y muretes.....	46
Figura 38. Ensaye a compresión en piezas de tabicón.	47
Figura 39. Prueba para determinar la absorción inicial en piezas de tabicón.	49
Figura 40. Prueba para determinar la absorción máxima a 24 horas (Jaen, 2015).	50
Figura 41. Determinación del módulo de ruptura (Jaen, 2015).	51
Figura 42. Ensaye de cubos de mortero (Jaen, 2015).....	52

Figura 43. Pila para prueba a compresión (NMX-C-464-ONNCCE-2010).	53
Figura 44. Determinación del módulo de elasticidad de la mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010).	54
Figura 45. Ensaye de pila construida con piezas de tabicón.	55
Figura 46. Murete para prueba a compresión diagonal (NMX-C-464-ONNCCE-2010).	55
Figura 47. Obtención del módulo de rigidez a cortante de la mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010).	57
Figura 48. Ensaye de murete construido con piezas de block de concreto ligero.	58
Figura 49. Dimensiones de los muros ensayados (Jaen, 2015).	59
Figura 50. Dimensiones de la dala de cimentación (Jaen, 2015).	59
Figura 51. Características del armado de la dala de cimentación (Jaen, 2015).	60
Figura 52. Características del armado de la losa (Jaen, 2015).	60
Figura 53. Instrumentación de los muros (Romero, 2015).	61
Figura 54. Medición de desplazamientos en la dala de cimentación.	61
Figura 55. Medición de desplazamientos en la losa.	61
Figura 56. Ensaye de especímenes en el muro de reacción.	62
Figura 57. Sistema hidráulico utilizado para aplicación de carga horizontal.	62
Figura 58. Viga utilizada durante los ciclos de carga.	63
Figura 59. Aplicación de cargas horizontales.	63
Figura 60. Contrapeso utilizado para aplicación de carga vertical.	63
Figura 61. Historia de carga (NTC-RCDF-2004).	64
Figura 62. Dimensiones de las piezas.	69
Figura 63. Prueba en muro testigo sin refuerzo construido con piezas de tabicón (Jaen, 2015).	75
Figura 64. Prueba en muro testigo sin refuerzo construido con piezas de block de concreto ligero (Jaen, 2015).	76

Figura 65. Envoltente de respuesta de muro testigo sin refuerzo construido con piezas de tabicón.	76
Figura 66. Envoltente de respuesta de muro testigo sin refuerzo construido con piezas de block de concreto ligero.	77
Figura 67. Colocación de multimalla ferretera en muro construido con tabicón (Romero, 2015). ...	78
Figura 68. Recubrimiento con mortero en muro rehabilitado construido con tabicón (Romero, 2015).	78
Figura 69. Colocación de multimalla ferretera en muro construido con block de concreto ligero (Romero, 2015).	78
Figura 70. Recubrimiento con mortero en muro rehabilitado construido con block de concreto ligero (Romero, 2015).	78
Figura 71. Envoltente de respuesta de muro testigo rehabilitado construido con piezas de tabicón.	79
Figura 72. Envoltente de respuesta de muro testigo rehabilitado construido con piezas de block de concreto ligero.	79
Figura 73. Ensaye de muro de tabicón reforzado.	80
Figura 74. Ensaye de muro de block de concreto ligero reforzado.	81
Figura 75. Envoltente de respuesta de muro reforzado construido con piezas de tabicón.	81
Figura 76. Envoltente de respuesta de muro reforzado construido con piezas de block de concreto ligero.	82
Figura 77. Envoltentes de respuesta de muros construidos con piezas de tabicón.	83
Figura 78. Envoltentes de respuesta de muros construidos con piezas de block de concreto ligero.	85
Figura 79. Envoltentes de respuesta de los muros ensayados.	85
Figura 80. Simplificación del agrietamiento en el muro sobre una diagonal a 45°.	86
Figura 81. Equilibrio de la parte superior del modelo simplificado.....	87
Figura 82. Círculos de Mohr de los esfuerzos normales en la longitud a compresión de la diagonal.	88

Figura 83. Comparación de las envolventes de respuesta con los valores teóricos (tabicón).	95
Figura 84. Comparación de las envolventes de respuesta con los valores teóricos (block de concreto ligero).....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas de piedras naturales (Vasconcelos y Sánchez, 2003).	3
Tabla 2. Características típicas de piezas artificiales (Vasconcelos y Sánchez, 2003).	6
Tabla 3. Proportionamientos en volumen recomendados para mortero en elementos estructurales (NTC-RCDF-2004).	7
Tabla 4. Características de las barras de acero de refuerzo comúnmente usadas para la construcción de vivienda (NMX-C-407-ONNCCE-2001).	10
Tabla 5. Factores correctivos por esbeltez de las pilas (NMX-C-464-ONNCCE-2010).	18
Tabla 6. Criterios para determinar el grado de daño de muros de mampostería después de un sismo (Rodríguez y Castrillón, 1995).	26
Tabla 7. Aplicabilidad de los métodos de evaluación y ensayos en sitio (Alcocer, 2003).	27
Tabla 8. Valores aceptables de absorción inicial (NMX-C-404-ONNCCE-2005).	48
Tabla 9. Valores aceptables de absorción máxima a 24 horas (NMX-C-404-ONNCCE-2005).	50
Tabla 10. Peso volumétrico neto mínimo de piezas, en estado seco (NTC-RCDF-2004).	52
Tabla 11. Características del refuerzo utilizado durante los ensayos en muros.	58
Tabla 12. Dimensiones obtenidas en las piezas de tabicón y block de concreto ligero.	69
Tabla 13. Resistencia a compresión de diseño.	70
Tabla 14. Absorción inicial.	70
Tabla 15. Absorción máxima a 24 horas.	70
Tabla 16. Módulo de ruptura.	71
Tabla 17. Peso volumétrico.	71
Tabla 18. Resistencia de diseño del mortero.	71
Tabla 19. Resistencia a compresión de pilas.	73
Tabla 20. Módulo de elasticidad.	73
Tabla 21. Resistencia a compresión diagonal de muretes.	74

Tabla 22. Módulo de cortante.....	74
Tabla 23. Resultados de las pruebas en muros testigo sin refuerzo.	75
Tabla 24. Resultados de las pruebas en muros testigo rehabilitados.	77
Tabla 25. Resultados de las pruebas en muros reforzados.	80
Tabla 26. Comparación de los resultados obtenidos en muros construidos con piezas de tabicón.	82
Tabla 27. Comparación de los resultados obtenidos en muros construidos con piezas de block de concreto ligero.	84
Tabla 28. Comparación de las predicciones teóricas con resultados de pruebas experimentales en muros testigo sin refuerzo.	92
Tabla 29. Comparación de las predicciones teóricas con resultados de pruebas experimentales en muros testigo rehabilitados.	93
Tabla 30. Relación entre predicciones teóricas y valores reales en muros testigo rehabilitados. ...	93
Tabla 31. Comparación de las predicciones teóricas con resultados de pruebas experimentales en muros reforzados.	94
Tabla 32. Relación entre predicciones teóricas y valores reales en muros reforzados.....	94
Tabla 33. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Alcocer et al. (1996) en muro testigo sin refuerzo	96
Tabla 34. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Alcocer et al. (1996) en muros reforzados.	96
Tabla 35. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Alcocer et al. (1996) en muros reforzados.	96
Tabla 36. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2004) en muros testigo sin refuerzo.	97
Tabla 37. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2004) en muros testigo rehabilitados.	97
Tabla 38. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Flores et al. (2004) en muros testigo rehabilitados.	98

Tabla 39. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Velázquez et al. (2010) en muros testigo sin refuerzo.	98
Tabla 40. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2012) en muro testigo sin refuerzo.	99
Tabla 41. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2012) en un muro testigo rehabilitado.	99
Tabla 42. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Flores et al. (2012) en muro testigo rehabilitado.	99
Tabla 43. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Pineda y Alcocer (2004) en muros reforzados.	100
Tabla 44. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Pineda y Alcocer (2004) en muros reforzados.	100

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Conceptos generales

La mampostería se define como un conjunto de elementos pétreos naturales (areniscas, basaltos, granito, mármol) o artificiales (arcillas, concreto, silicio calcáreo), unidos por medio de un mortero con el fin de formar una estructura resistente. Su presentación es muy variada, pudiendo encontrarse al natural, en el caso de piedras, o en forma de tabiques y bloques, tanto macizos como huecos, en el caso de la arcilla y el concreto.

A lo largo de la historia la mampostería ha jugado, en general, un papel fundamental para el hombre, dándole refugio y protección. México tiene una larga y destacada trayectoria en el empleo de la mampostería para la construcción, el material está fuertemente arraigado en la cultura nacional y es objeto de gran aceptación, especialmente para la vivienda.

En las escuelas de ingeniería civil de las universidades hablamos de estructuras de concreto, acero, madera y mampostería, pero les damos mayor importancia a las dos primeras, sin embargo, esta última es la más frecuente en el campo laboral del ingeniero civil.

En México más del 90% de la vivienda, ya sea unifamiliar o multifamiliar, se construye a base de muros de carga de mampostería. Esto hace que la edificación de vivienda a base de este sistema estructural represente un poco más del 50% del volumen total de la construcción que se hace en nuestro país.

A pesar de que la mampostería es un material muy utilizado para la construcción de distintos tipos de estructuras, los criterios de diseño marcados en las normas se basan en principios muy simples comparados con el análisis que se realiza cuando se utiliza otro tipo de material como el concreto o el acero. Esto se debe a que sus propiedades son muy variables y se vuelve muy complicado encontrar métodos de diseño más precisos en los que se puedan generalizar los resultados de pruebas experimentales.

En estructuras en las que se utilizan elementos de mampostería es importante conocer los efectos producidos por la acción de fenómenos naturales como los sismos y los asentamientos diferenciales, que inducen esfuerzos cortantes.

El desempeño de este tipo de estructuras frente a los efectos sísmicos ha sido en ocasiones muy criticado, sobre todo si se compara con el comportamiento de estructuras de concreto reforzado. Ciertamente, las construcciones de mampostería son generalmente muy rígidas y frágiles, por ello resultan especialmente sensibles a los sismos, sin embargo, se ha verificado experimentalmente que con refuerzo y confinamiento adecuados, son capaces de soportar deformaciones importantes con un nivel aceptable de daño.

Por otra parte, un tema muy importante en el campo de la ingeniería estructural y sísmica, es el que se refiere a la rehabilitación de estructuras existentes que han sufrido daño por la acción de diferentes fenómenos. A pesar de que los resultados de las investigaciones que actualmente se realizan permiten llevar a cabo mejores diseños, la mayor parte de las estructuras utilizadas hoy en día fueron diseñadas y construidas siguiendo lineamientos marcados por reglamentos anteriores y menos estrictos.

Es por las razones anteriores que, a pesar de tener alta rigidez y resistencia, el uso de la mampostería se ha limitado y no se han aprovechado al máximo sus propiedades como material estructural.

1.2 Materiales

El comportamiento mecánico de la mampostería depende de las propiedades de las piezas, tales como su resistencia a compresión, su forma, rugosidad, absorción y el tamaño y disposición de huecos. También depende de las características del mortero empleado, cuya dosificación debe ser cuidadosa, especialmente en el control de la cantidad de agua para lograr la resistencia a compresión deseada (Pineda y Alcocer, 2004).

1.2.1 Piezas de mampostería

Las unidades básicas para la construcción de estructuras de mampostería son las piezas, que por su origen pueden clasificarse como naturales o artificiales.

1.2.1.1 Piezas naturales

De acuerdo a la forma en que ha sido labrada la piedra natural, en México se distinguen los siguientes tipos de mampostería:

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

Las propiedades de las piedras naturales utilizadas son muy variables, en la tabla 1 se resumen algunas características de piedras utilizadas comúnmente en la construcción.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de piedras naturales (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

PIEDRA	PESO VOLUMÉTRICO SECO (ton/m³)	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm²)	RESISTENCIA A TENSIÓN EN FLEXIÓN (kg/cm²)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kg/cm²) * 10³
Areniscas	1.75 – 2.65	150 – 3 200	60 – 120	40 – 200
Basaltos (piedra braza)	2.30 – 3.00	800 – 5 800	200 – 300	100 – 300
Granito natural	2.40 – 3.20	800 – 3 000	100 – 200	400 – 500
Mármol	2.40 – 2.85	300 – 3 000	35 – 200	900

1.2.1.2 Piezas artificiales

Existe una gran variedad de piezas artificiales de mampostería (piedras artificiales), éstas difieren entre sí tanto por la materia prima utilizada, como por sus características geométricas y por los procedimientos de fabricación empleados. Las materias primas más comunes son el barro, el concreto y la arena con cal.

Los procedimientos de fabricación son muy variados, desde los artesanales, como el barro cocido en horno para los tabiques comunes, hasta los industrializados, entre los que se pueden mencionar la vibro-compactación, para los bloques de concreto, y la extrusión para el bloque hueco de barro. La forma es prismática pero con distintas relaciones entre las dimensiones (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

Según la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005 y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-RCDF-2004), las piezas para uso estructural pueden clasificarse en macizas o huecas.

Las piezas macizas son aquellas que tienen en su sección transversal más desfavorable un área neta de por lo menos 75 por ciento del área bruta, y cuyas paredes exteriores no tienen espesores menores a 20 mm.

Las piezas huecas (figura 1) son las que tienen, en su sección transversal más desfavorable, un área neta de por lo menos 50 por ciento del área bruta; además, el espesor de sus paredes exteriores no es menor a 15 mm. Para piezas huecas con dos hasta cuatro celdas, el espesor mínimo de las paredes interiores deberá ser de 13 mm.

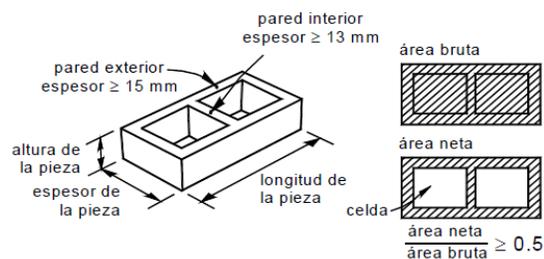


Figura 1. Piezas huecas (NTC-RCDF-2004).

Para piezas multiperforadas (figura 2), cuyas perforaciones sean de las mismas dimensiones y con distribución uniforme, el espesor mínimo de las paredes interiores será de 7 mm. Se entiende como piezas multiperforadas aquellas con más de siete perforaciones o alvéolos. Solo se permite usar piezas huecas con celdas o perforaciones ortogonales a la cara de apoyo.

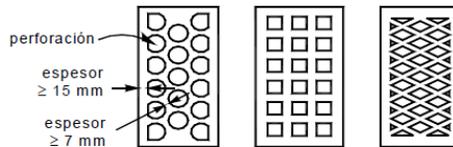


Figura 2. Piezas multiperforadas (NTC-RCDF-2004).

La importancia de esta distinción se debe a su forma de comportamiento: ante cargas laterales, debido a la mayor resistencia de una pieza maciza, las fisuras que se presentan tienden a seguir el mortero y, por lo tanto, generan trayectorias más largas y un mejor desempeño. En cambio, las piezas huecas son fácilmente atravesadas por las fisuras y conllevan a un comportamiento más frágil.

Las normas prohíben el uso de piezas con huecos horizontales ya que su comportamiento es muy deficiente, asociado a una falla frágil, y con poca disipación de energía después del agrietamiento, cuando se pierden las paredes de la pieza.

Cuando un muro ha quedado agrietado, las piezas macizas mantienen cierta integridad friccionando a través de las superficies de sus grietas, triturándose y pulverizándose, pero disipando energía; en cambio las piezas huecas tienden a perder las paredes rápidamente después de que el muro se agrieta, por lo que su capacidad de mantener la carga y disipar energía en la etapa inelástica (tras el agrietamiento) es menor (Pérez, 2012).

En la tabla 2 se presentan valores representativos de las propiedades mecánicas de las piezas de uso más frecuente. Puede observarse que incluso para un mismo tipo de piedra existen grandes variaciones en las resistencias promedio y en el control de calidad, reflejado en los coeficientes de variación.

Tabla 2. Características típicas de piezas artificiales (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN f_p (kg/cm ²)	COEFICIENTE DE VARIACIÓN c_v	PESO VOLUMÉTRICO (ton/m ³)
Tabique rojo de barro recocido	35 – 115	10 – 30	1.30 – 1.50
Tabique extruido perforado verticalmente	150 – 430 310 – 570 150 – 400	11 – 25 15 – 20 11 – 26	1.65 – 1.96 1.61 – 2.06 1.66 – 2.20
Tabique extruido macizo	375 – 900	5 – 16	1.73 – 2.05
Tabique extruido, huecos horizontales	75 – 80 50 – 80	13 – 18 16 – 30	1.25 – 1.32 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 – 1.60
Silicio calcáreo	175 – 200	11 – 15	1.79

Dos materiales no mencionados en la tabla, pero de gran importancia, son el adobe y el tabique de suelo-cemento. El adobe es un material muy utilizado 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).

1.2.2 Morteros

Este producto es conocido en otros países como cemento para albañilería, sin embargo, desde sus inicios se conoce en México con el nombre de mortero, más por tradición comercial que por tratarse de una palabra con algún origen técnico.

La norma NMX-C-021-ONNCCE-2004 define al mortero como el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado, que al agregarle agua y arena, tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo.

Las principales propiedades de los morteros son: su resistencia a compresión, adherencia con la pieza, módulo de elasticidad, trabajabilidad, rapidez de fraguado e impermeabilidad. Otra característica importante es su retención de agua, es decir, su capacidad para evitar que la pieza absorba el agua necesaria para el fraguado del mortero.

De acuerdo a las NTC-RCDF-2004, el mortero se clasifica en tipo I, II y III, según la resistencia que tenga, la cual deberá ser por lo menos de 125, 75 y 40 kg/cm², respectivamente (tabla 3).

Tabla 3. Proporcionamientos en volumen recomendados para mortero en elementos estructurales (NTC-RCDF-2004).

TIPO DE MORTERO	PARTES DE CEMENTO HIDRÁULICO	PARTES DE CEMENTO DE ALBAÑILERÍA	PARTES DE CAL HIDRATADA	PARTES DE ARENA	RESISTENCIA NOMINAL EN COMPRESIÓN f_j^* , MPa (kg/cm ²)
I	1	-	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen	12.5 (125)
	1	0 a ½	-		7.5 (75)
II	1	-	¼ a ½		
	1	½ a 1	-		
III	1	-	½ a ¼		

Diversas investigaciones han demostrado que la adherencia entre el mortero y las piezas de mampostería es de naturaleza mecánica. Cuando el mortero se pone en contacto con la pieza, ésta succiona lechada que penetra por los poros capilares. Al cristalizarse forma una trabazón mecánica que es la base de la adhesión entre

ambos elementos. Este fenómeno será incrementado tanto por el aumento de la rugosidad superficial en la cara de la unidad, como por la presencia de cavidades o alvéolos en la misma (Gallegos, 1989). En la figura 3 se muestra en forma esquemática el proceso descrito:

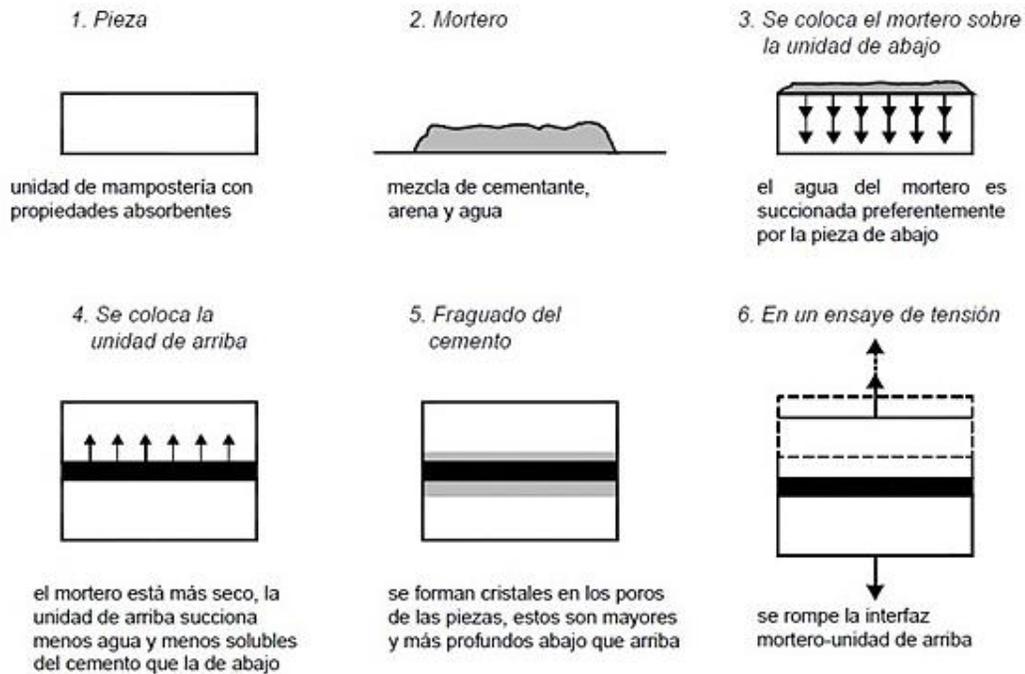


Figura 3. Mecánica de la adherencia entre piezas y mortero (Gallegos, 1989).

Puede observarse que en la pieza inferior se desarrolla por la naturaleza del proceso constructivo, una mayor adherencia con respecto a la pieza superior que succiona menos lechada. Para minimizar este efecto e incrementar la adherencia, Vasconcelos y Sánchez (2003) mencionan los siguientes procedimientos:

- a) Proveer juntas de mortero gruesas, de manera que la succión de agua por la unidad de abajo no alcance a afectar la disponible para la de arriba. La consecuencia de este procedimiento es la reducción de la resistencia a compresión de la mampostería.
- b) Reducir la succión en el momento del asentado de la pieza cuando es elevada. Esto implica humedecer la unidad, incorporando un factor más de variabilidad difícilmente controlable.

- c) Aumentar la consistencia del mortero (aumentando la cantidad de agua en el mismo) o aumentando su retentividad (cualidad del mortero que mide su consistencia o fluidez durante su colocación, cuando entra en contacto con superficies absorbentes), por ejemplo, añadiendo cal en la dosificación.

1.2.3 Acero de refuerzo

En la construcción de estructuras de concreto, el acero que normalmente se utiliza es la varilla corrugada grado 42 fabricada bajo la norma NMX-407-ONNCCE-2001, pero en estructuras de mampostería además de este tipo de acero, se utiliza refuerzo de alta resistencia estirado en frío, cuya presentación es en varillas o en elementos electrosoldados con formas específicas para eliminar el proceso de habilitado en sitio como los castillos (Pérez, 2012).

Según las NTC-RCDF-2004, el refuerzo que se emplee en castillos, dalas y/o elementos colocados en el interior del muro, estará constituido por barras corrugadas, malla de acero, alambres corrugados laminados en frío o por armaduras soldadas por resistencia eléctrica de alambre de acero para castillos y dalas.

Se admite el uso de barras lisas, como el alambrón, únicamente en estribos, en mallas de alambre soldado o en conectores. El diámetro mínimo del alambrón para ser usado en estribos es de 5.5 mm.

Para el refuerzo que debe colocarse en el interior de juntas o en los huecos de las piezas es recomendable emplear la mayor cantidad de barras y alambres de pequeño diámetro para asegurar un recubrimiento adecuado y facilitar el correcto llenado de los espacios donde se coloca el refuerzo (Vasconcelos y Sánchez, 2003).

La utilización en la junta de mortero de barras y alambres de diámetro pequeño, ha demostrado que el uso del refuerzo mejora la resistencia al cortante, reduce el ancho de grietas y proporciona una mayor capacidad de deformación ante fuerzas laterales. El refuerzo en la junta de mortero debe hacerse, necesariamente, con alambres delgados cuyo diámetro no exceda la mitad del espesor nominal de la junta.

Los diámetros de acero de refuerzo más usados para la construcción de vivienda se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Características de las barras de acero de refuerzo comúnmente usadas para la construcción de vivienda (NMX-C-407-ONNCCE-2001).

DENOMINACIÓN	DIÁMETRO		ÁREA (cm ²)	PESO (kg/m)	f_y (kg/cm ²)	NOTAS
	mm	in				
Alambrón No. 2	6.4	1/4	0.32	0.248	2 100	Lisa
No. 2.5	7.9	5/16	0.49	0.388	4 200	Corrugada
No. 3	9.5	3/8	0.71	0.560	4 200	
No. 4	12.7	1/2	1.27	0.994	4 200	
No. 5	15.9	5/8	1.98	1.552	4 200	

Las NTC-RCDF-2004 prohíben explícitamente el uso de escalerilla para resistir fuerza cortante inducida por sismo en los muros, esto derivado de pruebas experimentales sobre muros sometidos a cargas cíclicas en donde se observó que los alambres longitudinales de la escalerilla se rompen cerca de las uniones soldadas antes de alcanzar su máxima elongación, en su lugar se recomienda utilizar alambres sueltos anclados en sus extremos y sin traslape.

1.3 Tipos de muros

1.3.1 Muros diafragma

Estos muros están rodeados por las trabes y columnas de un marco estructural al que proporcionan rigidez ante la acción de cargas laterales. Pueden ser de mampostería confinada, reforzada interiormente, no reforzada o de piedras naturales. El espesor de la mampostería en este tipo de muros no debe ser menor a 10 cm.

La unión entre el marco y el muro diafragma debe garantizar la estabilidad de éste bajo la acción de fuerzas perpendiculares al plano del muro. Las columnas del

marco deben ser capaces de resistir, cada una, en una longitud igual a una cuarta parte de su altura libre medida a partir del paño de la viga, una fuerza cortante igual o mayor a la mitad de la carga lateral que actúa sobre el tablero (figura 4).

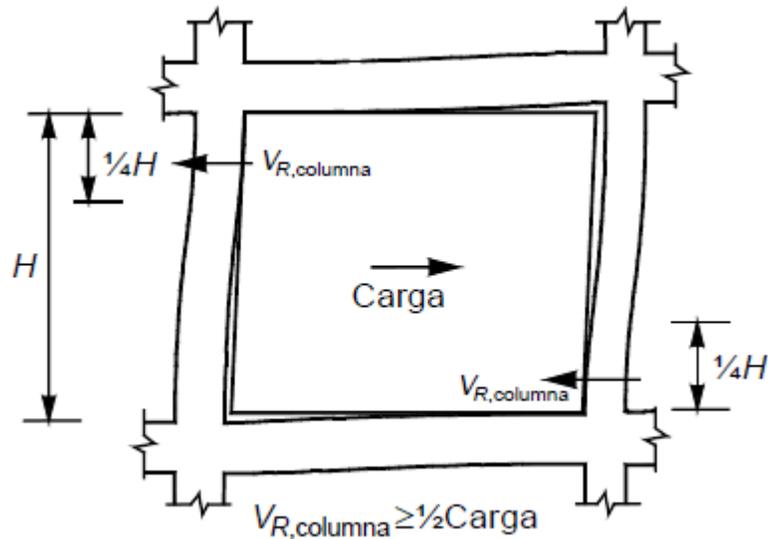


Figura 4. Interacción marco-muro diafragma (NTC-RCDF-2004).

Los muros diafragma se construyen en un tiempo posterior al marco, pudiéndose integrar a él, usándolos como cimbra parcial de trabes y columnas. Los elementos de borde (trabes y columnas) son robustos en comparación al muro, lo cual evita que se deformen junto con él.

1.3.2 Muros confinados

Son muros reforzados con castillos y dalas que cumplen con los requisitos geométricos y de refuerzo marcados en las secciones 5.1.1 a 5.1.4 de las NTC-RCDF-2004 (figura 5). En este tipo de muros, los castillos o porciones de ellos se cuelan una vez construido el muro o la parte de él que corresponde.

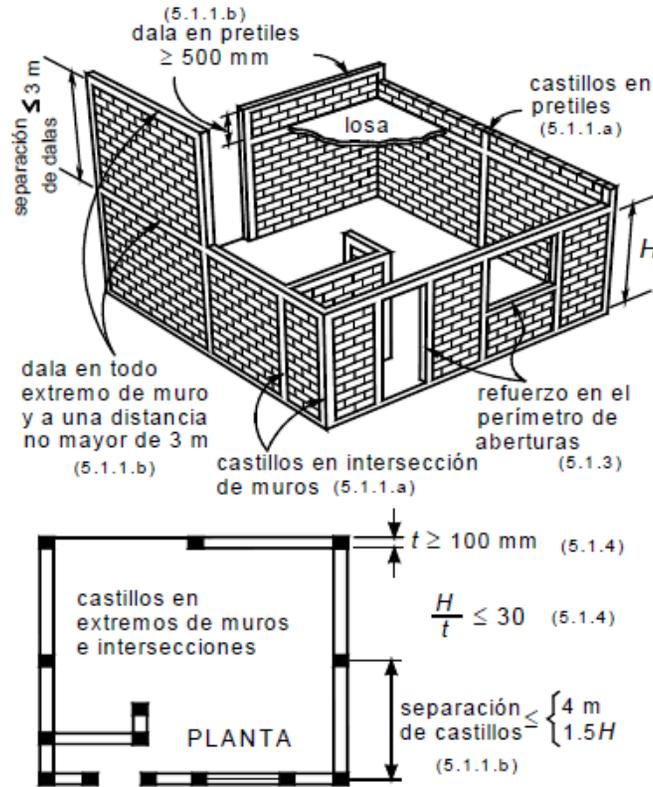


Figura 5. Requisitos para mampostería confinada (NTC-RCDF-2004).

Los muros pueden llevar o no refuerzo horizontal en las juntas, si lo hay, éste debe anclarse a los castillos. Debe haber elementos de refuerzo (dalas y castillos), en el perímetro de todo hueco cuya dimensión exceda de la cuarta parte de la dimensión del muro en la misma dirección (figuras 6 y 7).

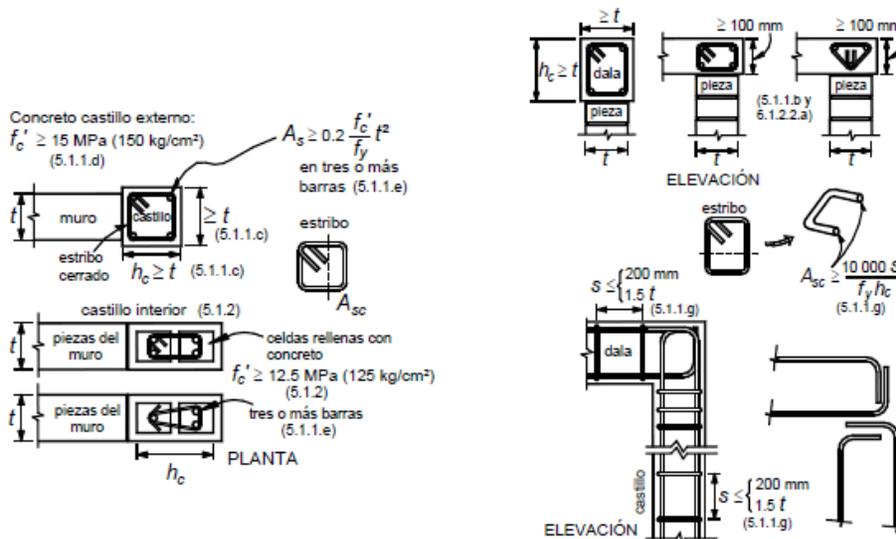


Figura 6. Castillos y dalas (NTC-RCDF-2004).

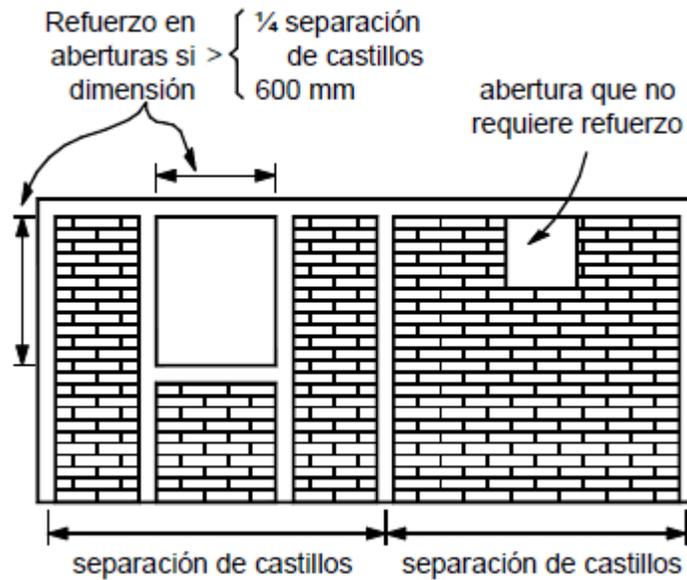


Figura 7. Refuerzo en el perímetro de aberturas (NTC-RCDF-2004).

1.3.3 Muros reforzados interiormente

Son aquellos muros que se construyen con piezas de mampostería huecas, están reforzados con barras o alambres corrugados de acero, horizontales y verticales, colocados en las celdas de las piezas, en ductos o en las juntas.

Para rellenar las cavidades donde se coloca refuerzo vertical podrá emplearse el mismo mortero que se usa para pegar las piezas o un concreto de alto revenimiento. El refuerzo en los bordes de los muros debe ser tal que cumpla las funciones de un elemento de confinamiento.

El acero de refuerzo, tanto horizontal como vertical, debe distribuirse a lo alto y largo del muro. Para que un muro pueda considerarse como reforzado deberá cumplir con los requisitos marcados en las secciones 6.1.1 a 6.1.9 de las NTC-RCDF-2004 (figuras 8 a 10).

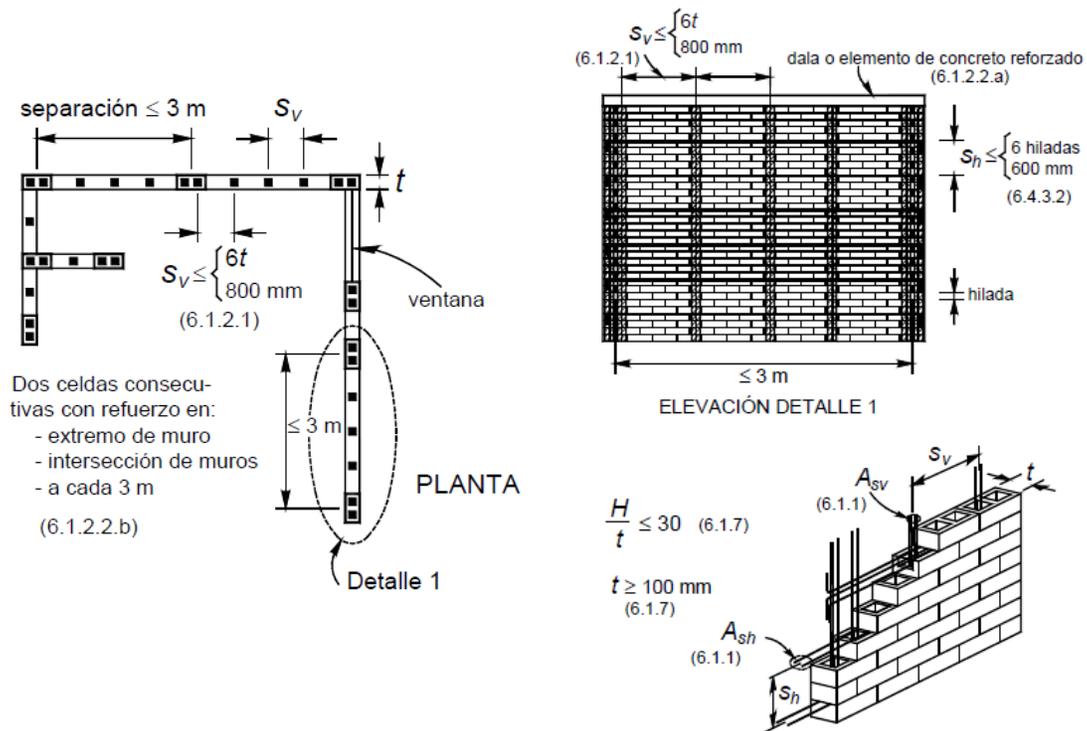


Figura 8. Requisitos para mampostería con refuerzo interior (NTC-RCDF-2004).

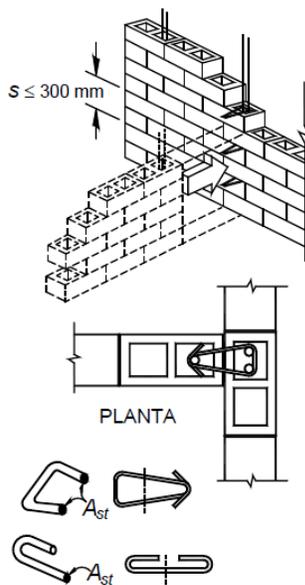


Figura 9. Conectores entre muros sin traslape de piezas (NTC-RCDF-2004).

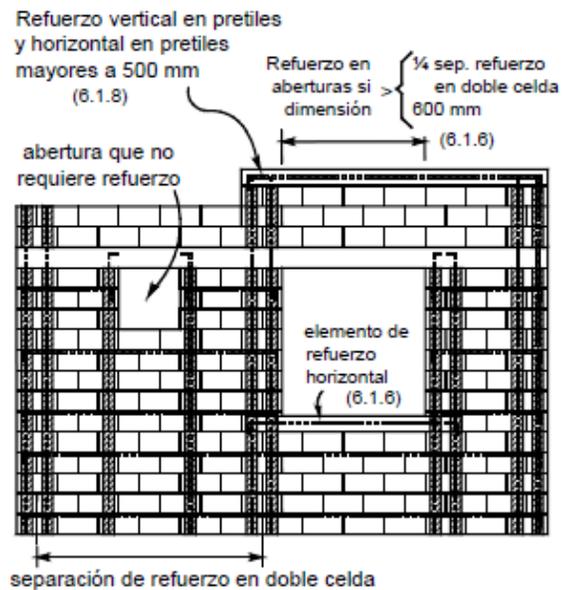


Figura 10. Refuerzo en aberturas y pretiles (NTC-RCDF-2004).

Deberá existir una supervisión continua durante la ejecución de la obra, que asegure que el refuerzo esté colocado de acuerdo a las especificaciones de los

planos y que los huecos en los que se aloja el acero de refuerzo sean colados completamente.

1.4 Comportamiento mecánico de la mampostería

En la producción de piezas artificiales existe una gran diversidad, tanto en la calidad de la materia prima utilizada, como en los procesos de manufactura y en las formas geométricas que se comercializan. En los morteros también existe una gran variabilidad, dado que con frecuencia se usan proporcionamientos en volumen distintos de los componentes básicos, los cuales varían de región a región.

Por otra parte, frecuentemente se utilizan distintos espesores de junta de mortero, que son función del tipo de pieza, la modalidad de mampostería que se utiliza, así como del conocimiento y práctica profesional de cada región, por lo tanto, se dificulta establecer una descripción general del comportamiento mecánico de la mampostería, y en muchas ocasiones hace poco confiable la extrapolación de resultados de un tipo de mampostería a otro.

Es deseable que el comportamiento de las distintas modalidades de mampostería se estudie principalmente a través de ensayos de especímenes a escala natural para las sollicitaciones más usuales, sin embargo, esto no siempre es posible, y si se pretende establecer criterios generales para estimar su comportamiento mecánico, es necesario estudiar sus mecanismos de falla ante las sollicitaciones básicas y determinar sus propiedades mecánicas elementales, esto puede efectuarse mediante ensayos simples en pequeños conjuntos de piezas y mortero (Tena y Miranda, 2003).

1.4.1 Resistencia a compresión de piezas de mampostería

Uno de los parámetros más importantes de una pieza desde el punto de vista estructural es su resistencia a compresión, determinada mediante el ensayo directo de la unidad entera o de la mitad de ella. La resistencia a compresión determinada de esta manera no es un parámetro uniforme de calidad, ya que los resultados obtenidos en piezas de materiales o geometrías distintos no son comparables y no

se relacionan en la misma forma con la resistencia que puedan tener las piezas en un elemento estructural.

La razón de estas diferencias está en que las restricciones a las deformaciones transversales, producidas por la fricción con las placas de la máquina de ensaye, introducen compresiones transversales que afectan la resistencia de las piezas. La forma en que influye esta restricción depende no sólo de la relación altura a espesor del espécimen, sino también del material del cual está compuesta la pieza, por lo tanto, no ha sido posible encontrar un procedimiento general para estandarizar los resultados a un caso uniforme (Meli y Reyes, 1971).

Por las razones anteriores, los resultados de un ensaye de compresión solamente son comparables para piezas del mismo tipo, y la relación entre la resistencia a la compresión de la pieza y el comportamiento estructural del muro puede ser diferente para materiales distintos.

La resistencia a compresión para cada tipo de pieza se determina en base al ensaye especificado en la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004. El valor de la resistencia se mide sobre el área bruta y se determina como el valor alcanzado por lo menos por el 98 por ciento de las piezas producidas.

1.4.2 Resistencia a compresión del mortero

Con excepción de morteros extremadamente débiles, las propiedades mecánicas que más influyen en el comportamiento estructural de un elemento de mampostería son su deformabilidad y su adherencia con las piezas.

De la primera propiedad dependen en gran medida las deformaciones totales del elemento de mampostería y en parte su resistencia a carga vertical; la adherencia entre el mortero y las piezas define en muchos tipos de mampostería (sobre todo en aquellos en que las piezas son muy resistentes) la resistencia por cortante del elemento (Tena y Miranda, 2003).

Es importante que el mortero tenga una manejabilidad adecuada para que pueda ser colocado en capas uniformes sobre las que se asienten bien las piezas, evitándose concentraciones de esfuerzos y excentricidades accidentales.

La resistencia a compresión del mortero no tiene una influencia preponderante en el comportamiento estructural de la mampostería, sin embargo, el control de calidad se basa en la determinación de esta propiedad a través del ensaye de cubos de 5 cm de lado.

La norma NMX-C-061-ONNCCE-2001 establece el método de prueba para determinar la resistencia a compresión del mortero, ya sea para pegar piezas o ser usado como relleno. Se deberán obtener como mínimo tres muestras, cada una de al menos tres probetas cúbicas, las nueve probetas se ensayarán de acuerdo al procedimiento establecido por la norma mencionada. El valor de la resistencia se determina como el que es alcanzado por lo menos por el 98 por ciento de las muestras.

1.4.3 Resistencia a compresión de pilas

El ensaye que se utiliza para obtener un índice de la resistencia a compresión de la mampostería, y para estudiar la relación esfuerzo-deformación y el efecto de las diferentes variables, es el de una pila o prisma formado por varias piezas sobrepuestas (figura 11).

La norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 define una pila como la probeta formada por la superposición de al menos tres piezas y con el número suficiente de hiladas para que la relación de esbeltez (cociente entre la altura y el espesor) se encuentre entre dos y seis. Si la relación de esbeltez no se encuentra entre los límites anteriores, se debe desechar la probeta.

En general, se acostumbra construir pilas de cinco piezas sobrepuestas, ya que así se obtiene una relación altura a espesor aproximadamente de cuatro, que es la relación óptima reconocida por las NTC-RCDF-2004.

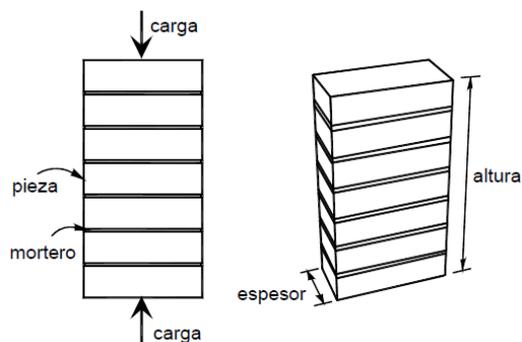


Figura 11. Pila para prueba en compresión (NTC-RCDF-2004).

Las normas establecen que se deben ensayar un mínimo de nueve pilas en total, construidas con piezas provenientes de por lo menos tres lotes diferentes del mismo producto. El esfuerzo medio obtenido, calculado sobre el área bruta, se multiplicará por un factor correctivo de esbeltez de acuerdo con la tabla 5.

Tabla 5. Factores correctivos por esbeltez de las pilas (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

RELACIÓN DE ESBELTEZ	FACTOR CORRECTIVO
2	0.75
3	0.90
4	1.00
5	1.05
6	1.06

Para relaciones altura a espesor intermedias se interpolará linealmente. Las NTC-RCDF-2004 proporcionan alternativas para la determinación de la resistencia de diseño con base en las piezas y el mortero a emplear, sin embargo, es conveniente la realización de esta prueba al inicio de la obra para certificar que se cumpla con lo establecido en el proyecto (Pérez, 2012).

El comportamiento y los modos de falla de la mampostería ante cargas axiales dependen en forma importante de la interacción de piezas y mortero; ésta puede interpretarse de la siguiente forma: las piezas y el mortero tienen características esfuerzo-deformación diferentes, por lo tanto, al ser sometidos a un mismo esfuerzo se produce una interacción entre ambos que consiste en que el

material menos deformable, las piezas en general, restringe las deformaciones transversales del material más deformable, introduciendo en él esfuerzos de compresión de dirección transversal (figura 12). Por el contrario, en el material menos deformable se producen esfuerzos transversales de tensión que disminuyen su resistencia respecto a la que se obtiene en el ensaye de compresión simple del material aislado.

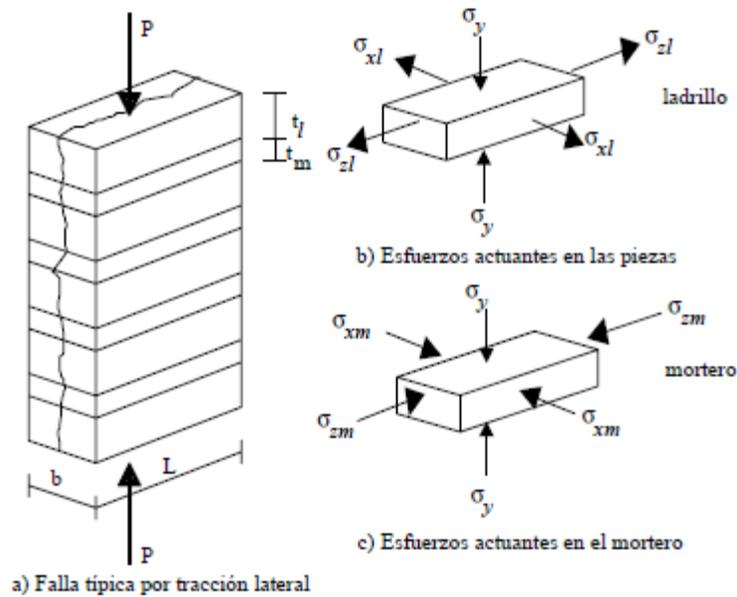


Figura 12. Mecánica típica de falla de la mampostería a compresión (Tena y Miranda, 2003).

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 producidas por las deformaciones transversales incrementadas por el efecto de las deformaciones del mortero en las juntas. Cuando este agrietamiento vertical se vuelve excesivo, se produce la inestabilidad del elemento y su falla. Para piezas de baja resistencia, la falla se presenta por aplastamiento en compresión de ellas. El aplastamiento del mortero generalmente no ocasiona la falla cuando los esfuerzos son puramente axiales, ya que éste, cuando se aplasta, es retenido por la fricción de las piezas, y el conjunto puede soportar cargas mayores, salvo que el mortero sea muy pobre en comparación con las piezas (Tena y Miranda, 2003).

1.4.4 Módulo de elasticidad

Este parámetro puede obtenerse a partir de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería f_m^* de la siguiente manera:

- a) Para mampostería de tabiques y bloques de concreto:

$$E_m = 800f_m^*, \text{ para cargas de corta duración.}$$

$$E_m = 350f_m^*, \text{ para cargas sostenidas.}$$

- b) Para mampostería de tabiques de barro y otras piezas, excepto las de concreto:

$$E_m = 600f_m^*, \text{ para cargas de corta duración.}$$

$$E_m = 350f_m^*, \text{ para cargas sostenidas.}$$

1.4.5 Resistencia a compresión diagonal

Existen muchas situaciones en las que un muro de mampostería se puede ver sometido a tensión diagonal. Una de las más importantes, es cuando una edificación se encuentra bajo el efecto de un sismo, sin embargo, existen otras situaciones en las que puede haber este tipo de sollicitación en la mampostería, por ejemplo, cuando se producen hundimientos diferenciales en una edificación, o bien, bajo la acción de cargas gravitacionales cuando existe una distribución poco uniforme de cargas verticales en un determinado muro.

Para estimar el comportamiento de la mampostería cuando es sometida a este tipo de acciones, se utiliza un ensaye que consiste en aplicar una carga de compresión diagonal a un murete de dimensiones aproximadamente cuadradas.

De acuerdo a la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010, un murete es una probeta con una longitud de al menos una vez y media la máxima dimensión de la pieza y con el número de hiladas para que su altura sea aproximadamente igual a la longitud.

Para la determinación de la resistencia de diseño a compresión diagonal de la mampostería v_m^* , se llevarán a cabo ensayos en muretes cuadrados sometidos a compresión a lo largo de una de sus diagonales, contruidos con las piezas y morteros que se emplearán en la obra (figura 13). El esfuerzo cortante medio se determinará dividiendo la carga máxima entre el área bruta del murete medida sobre la misma diagonal.

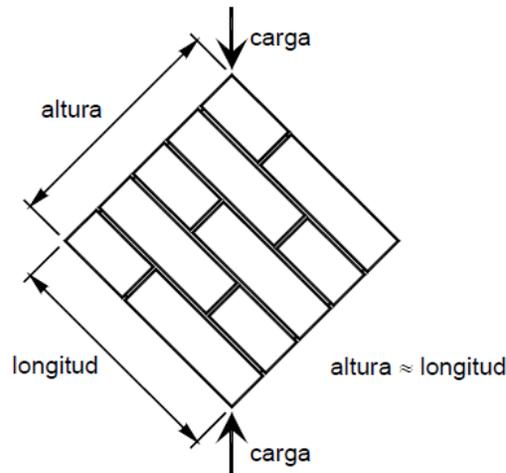


Figura 13. Murete para prueba en compresión diagonal (NTC-RCDF-2004).

El ensaye se realizará en un mínimo de nueve muretes a la edad de 28 días, contruidos con piezas provenientes de por lo menos tres lotes diferentes.

Durante esta prueba, 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 tiene un estado de esfuerzos de tensión a lo largo de la diagonal perpendicular a la que se produce la compresión. El esfuerzo resistente a la tensión es mucho menor que el esfuerzo resistente a la compresión de la mampostería, aunque se trate de un ensaye de compresión diagonal, el modo de falla es en prácticamente todos los casos por tensión diagonal.

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 juntas (Tena y Miranda, 2003).

En la figura 14 se muestran los principales tipos de falla de la mampostería en un ensaye de compresión diagonal.

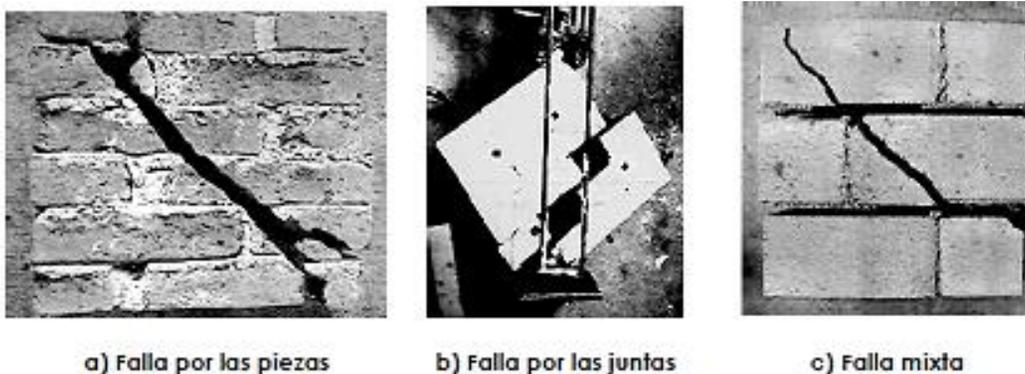


Figura 14. Modos de falla en ensayes de compresión diagonal (Meli, 1979).

Puede verse que un primer modo de falla (figura 14-a) es cuando el agrietamiento diagonal atraviesa las piezas, este tipo de falla normalmente se da cuando la resistencia a la tensión de las piezas es menor en relación con la adherencia del mortero. El segundo modo de falla mostrado (figura 14-b) corresponde a aquél en que el agrietamiento se da en las juntas, y se produce cuando la resistencia de las piezas es mayor en relación con la adherencia del mortero, por lo que el agrietamiento ocurre en el elemento débil, que en este caso es la junta. Finalmente, cuando el esfuerzo resistente a la tensión de las piezas es semejante a la adherencia entre piezas y mortero, se da un modo de falla mixto en que el agrietamiento diagonal se produce tanto en las piezas como en las juntas (figura 14-c).

1.4.6 Módulo de rigidez a cortante

El módulo de rigidez a cortante de la mampostería G_m , se puede determinar mediante ensayes de muretes construidos con las piezas y morteros que se emplearán en la obra, trazando las curvas esfuerzo-deformación correspondientes. En este tipo de curvas, la pendiente representa el módulo de rigidez a cortante, que

es una medida de cuánta deformación sufre la mampostería bajo un determinado nivel de esfuerzo cortante.

Diversos estudios han demostrado que el valor de la relación entre el módulo de rigidez a cortante G_m y el módulo de elasticidad E_m varía entre 0.1 y 0.3, lo cual es menor de lo que se calcula considerando un comportamiento elástico en un material isotrópico y, de hecho, no cumpliría con la ley de la isotropía, ya que de acuerdo con ella, el mínimo valor posible de dicha relación es 0.33 para satisfacer la teoría (considerando que el máximo valor teórico de la relación de Poisson es $\nu = 0.5$), por lo que lo anterior indica que modelar a la mampostería como un material isotrópico no es del todo adecuado y que debe tenerse especial cuidado en interpretar los resultados obtenidos de los análisis que se basan en esta hipótesis.

Las diferencias que desvían a la relación G_m/E_m de la teoría de la isotropía se deben, además de la anisotropía existente en las piezas, a las deformaciones de cortante y compresión del mortero, en el cual el efecto del confinamiento es distinto en los muretes en la prueba de compresión diagonal al que ocurre en pilas en la prueba de compresión. También hay que considerar que la aproximación con la que se pueden fijar los valores del módulo de cortante es muy pobre, ya que en el tramo lineal de la curva las deformaciones son muy pequeñas y pueden ser fácilmente afectadas por errores de medición (Tena y Miranda, 2003). Las NTC-RCDF-2004 adoptan para fines de análisis la siguiente expresión:

$$G_m = 0.4E_m$$

De esta manera, el módulo de rigidez a cortante se vuelve compatible con la teoría de la elasticidad lineal, homogénea e isotrópica.

1.5 Rehabilitación de estructuras de mampostería

La rehabilitación de la estructura de un edificio se puede describir como el conjunto de modificaciones e intervenciones necesario para mejorar su comportamiento ante acciones futuras. En particular, la rehabilitación sísmica comprende todas aquellas medidas tendientes a promover un comportamiento

adecuado de la estructura, de modo que se puedan satisfacer los niveles de desempeño sísmico establecidos.

El proceso de rehabilitación inicia con la evaluación de la estructura, con el objetivo de identificar sus debilidades potenciales, las cuales deben ser corregidas por los métodos que se estudien y desarrollen, cuidando de no producir nuevas. Desde un punto de vista económico, el o los esquemas de rehabilitación deben ser rentables. Si así se requiere, el proceso no debe modificar la función y uso de la estructura, además debe ser consistente con el diseño arquitectónico.

En general, se han sugerido tres filosofías para mejorar el comportamiento de una estructura ante acciones sísmicas: a) incrementar la resistencia, b) aumentar la capacidad de deformación inelástica, o c) aumentar ambas. Sin embargo, existen otras posibilidades, como son, debilitamiento local para cambiar el modo de falla, control pasivo o activo, mejorar la configuración estructural o reducir la masa reactiva.

En muchos casos, la solución óptima se obtiene combinando una o más de las técnicas básicas que serán descritas más adelante.

1.5.1 Evaluación y análisis de estructuras de mampostería existentes

El término *evaluación* se define como la revisión e investigación técnica de la configuración de la estructura existente, tipos de elementos y de materiales de construcción, condición y deficiencias, así como cualquier característica relevante al análisis y diseño estructural (Alcocer, 2003).

A diferencia de una estructura nueva, de inicio se desconocen las propiedades de los materiales, el estado de esfuerzos en los elementos y las normas y reglamentos que se aplicaron para su construcción. En algunos casos, hay estructuras que no fueron diseñadas ni construidas siguiendo las especificaciones de alguna norma, como ocurre frecuentemente en el sector de la autoconstrucción.

Durante la rehabilitación de una estructura existente, dependiendo de su importancia y características, así como del tiempo y recursos, se pueden aplicar diferentes niveles de evaluación y de análisis para conocer sus condiciones actuales.

A continuación se describen brevemente las actividades a llevar a cabo durante una evaluación:

- Registro documental de diseño y construcción. Consiste en reunir todo el material disponible acerca del diseño, construcción y modificaciones posteriores de la estructura. Se incluyen cálculos, especificaciones, normas, planos de diseño, modificaciones al proyecto, dictámenes, inspecciones, propiedades de materiales y cualquier otra evidencia que ayude a caracterizar el diseño original y la configuración actual.
- Inspecciones. La inspección de la estructura se hace con el fin de confirmar que la información recabada durante el registro documental en verdad refleje sus condiciones actuales. Esta etapa abarca la verificación de las dimensiones del edificio, el arreglo de los elementos y las propiedades mecánicas de los materiales.
- Propiedades de los materiales. Una cuestión muy importante en un proyecto de rehabilitación es el acceso a los elementos de carga a fin de poder cuantificar las propiedades de los materiales. En el caso de elementos de concreto se recomienda obtener probetas para ser ensayadas en el laboratorio. El nivel de muestreo y número de pruebas depende de la información disponible y de la condición de la estructura.
- Evaluación de grietas. La causa más frecuente de falla en la mampostería (entendiendo como falla a la alteración del nivel de desempeño o la condición por la cual deja de cumplir una función) son las grietas en los muros y no el colapso.

No existe una clasificación universal del ancho de las grietas que pueda considerarse peligroso, ya que esto depende de factores como la función de la estructura, tipo de acción, forma de la grieta, entre otros. Rodríguez y Castrillón

(1995) propusieron criterios para determinar el grado de daño en muros de mampostería por sismo (tabla 6).

Tabla 6. Criterios para determinar el grado de daño de muros de mampostería después de un sismo (Rodríguez y Castrillón, 1995).

GRADO	ESTADO DE DAÑO
I	Grietas pequeñas, difícilmente visibles sobre la superficie del muro. Grietas mínimas en castillos y dalas de confinamiento. Grietas con anchuras menores a 0.2 mm.
II	Grietas claramente visibles sobre la superficie del muro, con anchuras entre 0.2 y 1 mm.
III	Inicio de la formación de agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas. Grietas grandes en la superficie del muro, con anchuras entre 1 y 3 mm.
IV	Agrietamiento diagonal en muros confinados con castillos y dalas, o en muros de relleno ligados a marcos. Grietas con anchuras mayores a 3 mm. Inicio de la formación de agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas.
V	Desprendimiento de partes de piezas. Aplastamiento local de la mampostería. Prolongación del agrietamiento diagonal en castillos o en dalas (anchura de grietas superiores a 1 mm). Agrietamiento diagonal en muros sin castillos y dalas. Deformación, inclinación horizontal o vertical apreciable del muro.

1.5.2 Técnicas de evaluación y ensayos en el sitio de estructuras de mampostería

Existen diferentes métodos para evaluar las condiciones de las estructuras de mampostería existentes. La aplicabilidad de estas técnicas está en función de las características de la estructura y de las variables que se deseen medir.

Alcocer (2003) hace una descripción de varios métodos de evaluación y ensayos en sitio, y presenta las ventajas y desventajas de cada uno en cuanto a su aplicación en mampostería.

En la tabla 7 se enumeran algunas de estas técnicas haciendo una relación de su aplicabilidad de acuerdo a las condiciones que se van a evaluar.

Tabla 7. Aplicabilidad de los métodos de evaluación y ensayos en sitio (Alcocer, 2003).

CONDICIÓN	MÉTODO DE PRUEBA																
	Inspección visual	Martillo de rebote	Pruebas de extracción	Barrenado	Ensayes a corte en el plano	Corazones	Adherencia mortero-pieza	Gatos planos	Transmisión de pulso	Métodos magnéticos	Radiografías	Termografía infrarroja	Microondas	Resistividad	Potencial de corrosión	Petrografía	Pruebas de carga
Resistencia de las piezas																	
Resistencia en el plano																	
Uniformidad en el plano																	
Deformabilidad en el plano																	
Nivel de esfuerzos en el plano																	
Localización de grietas																	
Movimiento de grietas																	
Desempeño ante carga																	
Tamaño de barra, localización y recubrimiento																	
Localización de anclas																	
Vacios en mortero fluido																	
Vacios en la mampostería																	
Corrosión del acero de refuerzo																	
Problemas de durabilidad																	

1.5.3 Técnicas de rehabilitación

En la figura 15 se muestra la relación existente entre el desempeño que ha tenido la estructura por rehabilitar, el nivel de daño esperado y las técnicas de rehabilitación que pueden ser utilizadas. La gráfica es aplicable a muros de mampostería confinada, pero con algunas modificaciones menores puede usarse para otras modalidades de mampostería.

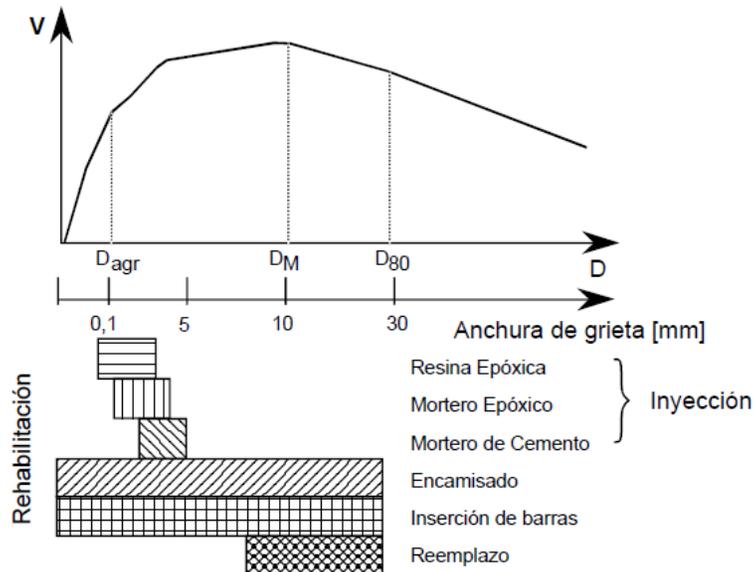


Figura 15. Desempeño de un muro de mampostería existente, nivel de daño esperado y posibles esquemas de rehabilitación (Alcocer, 2003).

1.5.3.1 Reemplazo de piezas y de concreto dañados

Este método se utiliza generalmente en muros con zonas muy dañadas, su eficiencia depende de la calidad de su ejecución. Frecuentemente se tiene la necesidad de apuntalar y renivelar la estructura para lograr un correcto reemplazo, así como de usar morteros o concreto con aditivos estabilizadores de volumen con el fin de disminuir la contracción por fraguado y las fisuras que ocurren por las restricciones a la contracción.

En el reemplazo de piezas y de concreto dañados deben usarse materiales del mismo tipo y con una resistencia cuando menos igual a la del material original. Es frecuente que se aproveche la reparación para mejorar la estructura mediante materiales de reemplazo con características mecánicas superiores a las originales, sin embargo, se debe tener presente que la inserción de piezas o concreto con propiedades muy diferentes puede tener como consecuencia concentraciones de esfuerzos que pueden dañar a la estructura, en estos casos, la rehabilitación resulta peor que el daño existente en el edificio. Ejemplo de esto es usar morteros con cambios volumétricos diferentes de la mampostería original, las expansiones

diferenciales generan deformaciones y esfuerzos locales que promueven el agrietamiento y el consecuente daño de la estructura.

1.5.3.2 Reparación de grietas

Esta técnica consiste en cerrar las grietas o rellenarlas con materiales similares o diferentes de la mampostería original. Existen dos métodos de reparación: a) inyección y b) rajueleo. En ambos casos, se debe retirar el aplanado de la zona de la grieta, cuando menos en los 30 cm adyacentes.

En el primer caso (figura 16), las grietas se rellenan mediante la inyección de resinas epóxicas, morteros epóxicos o morteros fluidos de cemento (con consistencia de lechada); este método es aplicable en muros con bajo número de grietas que, además, estén bien definidas, éste es el caso de muros sin refuerzo horizontal (o sin mallas) o con baja cuantía de refuerzo horizontal y vertical.

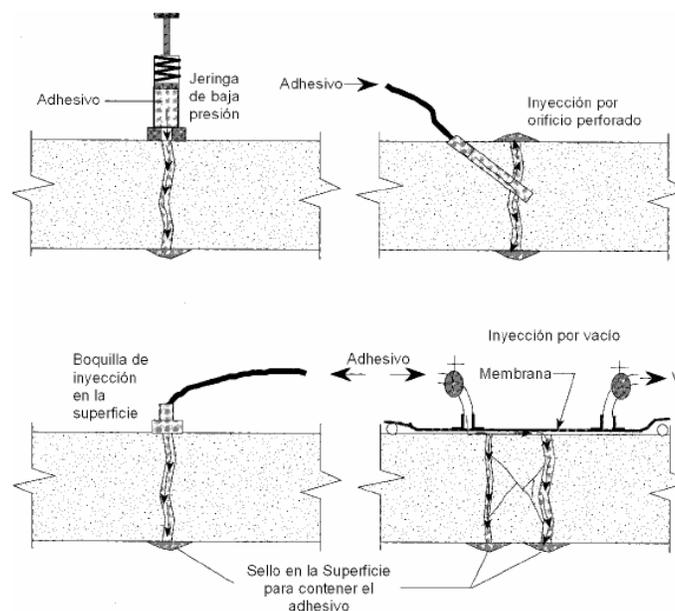


Figura 16. Técnicas para inyección de resinas en concreto agrietado (Alcocer, 2003).

El patrón de agrietamiento de muros con cuantías de refuerzo iguales o superiores a las mínimas reglamentarias se caracteriza por una distribución uniforme en el tablero, con un alto número de fisuras de anchura pequeña. Para este caso la inyección de grietas sería difícil y costosa.

La inyección de grietas representa una manera viable de mantener la funcionalidad del edificio, incrementar su seguridad y durabilidad, pero sin alterar el diseño arquitectónico.

1.5.3.3 Inserción de barras de refuerzo

Otra técnica de rehabilitación de muros de mampostería consiste en colocar barras de refuerzo a lo largo de las juntas de mortero (figura 17). Para alojarlas, se requiere preparar la junta con ranuras longitudinales y practicar barrenos transversales al muro a ciertos intervalos para amarrar a las barras entre sí. Una vez colocadas las barras, generalmente una en cada lado del muro, se recubren con mortero de cemento o tipo epóxico. Las barras se deben anclar en los extremos de los muros, preferentemente mediante ganchos estándar a 90° en los elementos confinantes, si existen.

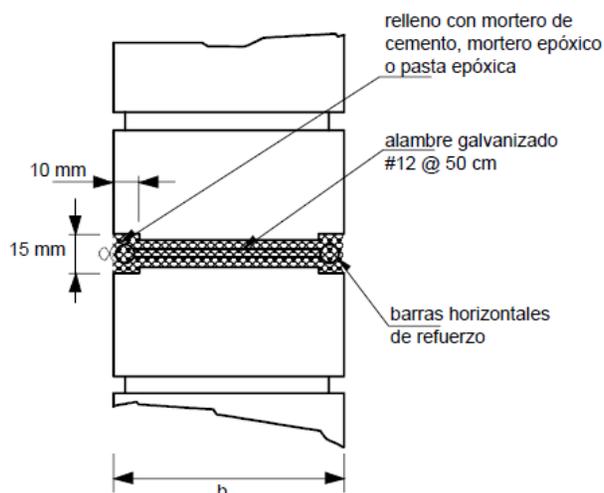


Figura 17. Inserción de barras de refuerzo en las juntas de un muro (Alcocer, 2003).

Aunque con esta técnica se alcancen recuperaciones aceptables de resistencia, rigidez y capacidad de deformación, exige un procedimiento muy laborioso y con buena supervisión, ya que su desempeño depende mucho de la calidad de la ejecución.

Otra alternativa de reparación es engrapar las fisuras del muro (figura 18), este método es práctico si el número de grietas es pequeño, consiste en alojar

barras de refuerzo con ganchos a 90° en sus extremos (en forma de una grapa para papel) en ranuras y barrenos practicados en el muro.

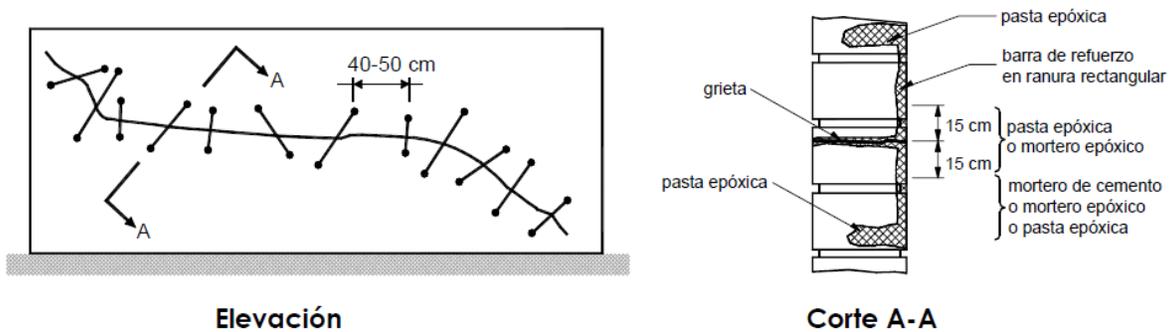


Figura 18. Colocación de grapas sobre grietas en muros de mampostería (Alcocer, 2003).

Las ranuras y barrenos se rellenan con mortero de cemento o, de preferencia, epóxico. Las grapas deben colocarse ortogonalmente a la grieta, de modo que resistan las tensiones que se producen cuando ésta tiende a abrirse.

Resultados de laboratorio han indicado un pobre comportamiento ante sismo de muros reparados de esta forma debido al pandeo de las grapas inclinadas cuando el sentido de aplicación de la carga se invierte y las grapas tienen que trabajar a compresión, sin embargo, su desempeño ante acciones monótonas ha sido satisfactorio. Esta técnica es bastante popular para restaurar monumentos históricos (Alcocer, 2003).

1.5.3.4 Encamisado de muros

Los muros se pueden rehabilitar adosando mallas metálicas y recubriéndolas con mortero de cemento colocado a mano o lanzado. Además, se pueden encamisar con ferrocemento, con un aplanado de concreto lanzado con fibras metálicas o con materiales sintéticos.

Una desventaja del encamisado de muros es la modificación de la apariencia de la estructura, lo cual puede ser determinante para el aspecto visual del edificio ya sea por su valor histórico o de diseño arquitectónico.

La eficiencia de esta técnica de rehabilitación ha sido evaluada experimentalmente en diversos estudios con muy buenos resultados. Alcocer

(2003) presenta algunas recomendaciones desarrolladas a partir de pruebas experimentales.

Para lograr un comportamiento monolítico del encamisado con la mampostería existente, es indispensable tratar la superficie del muro antes de colocar la malla y aplicar el mortero. Se debe retirar todo recubrimiento del muro y, en caso de muros dañados, los fragmentos y piezas sueltas de la superficie de la mampostería; limpiar el polvo y las partículas en el interior de las grietas mediante chorro de agua. Previo al encamisado, se recomienda reparar las grietas.

Las mallas se pueden fijar directamente sobre las caras del muro, o bien usando separadores. Sin embargo, ensayos de laboratorio han demostrado que el uso de separadores disminuye la resistencia al corte del sistema muro-conector-malla, aumenta la flexibilidad del conector y facilita su propia extracción. Para espesores de 30 o 40 mm, no representa ningún inconveniente adosar las mallas directamente al muro.

En muros hechos con piezas macizas, las mallas de calibre pequeño (8 y 10) se pueden fijar con clavos de 64 mm de longitud para madera colocados manualmente con martillo (figura 19).



Figura 19. Malla metálica anclada a un muro de mampostería con clavos (Alcocer, 2003).

Se recomienda una separación vertical y horizontal de 450 mm; si las piezas son de mala calidad se puede reducir la separación a 250 mm. Para mallas de mayor

calibre (4 o alambres con 6.4 mm de diámetro), se recomienda usar clavos Hilti tipo X-ZF o similar, de 51 mm de longitud con arandela (figuras 20 y 21).

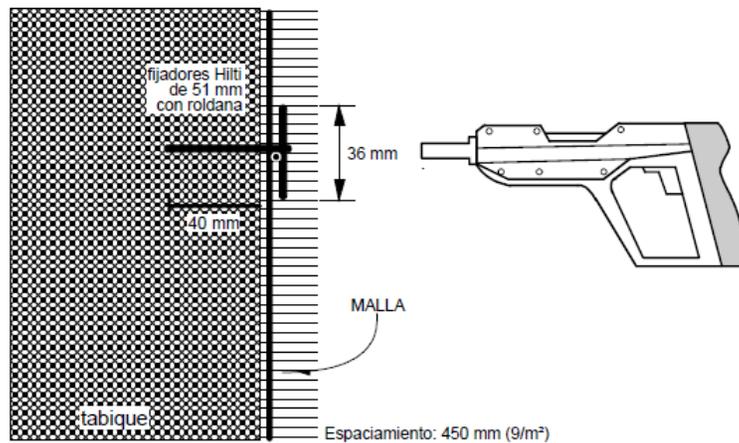


Figura 20. Conectores Hilti tipo X-ZF y herramienta para colocación (Alcocer, 2003).



Figura 21. Malla metálica anclada a un muro de mampostería con clavos Hilti (Alcocer, 2003).

Estos clavos son fijados a pólvora con una pistola especial, se recomienda usar una separación entre conectores de 450 mm. Los conectores Hilti también pueden ser usados en mallas de bajo calibre, aunque por pieza son más caros que un clavo, incluyendo el cartucho de pólvora, el rendimiento en su colocación es mucho mayor, y el desperdicio es prácticamente nulo.

En la práctica nacional y en la literatura mundial sobre el tema, se ha sugerido el uso de alambres (grapas o sujetadores) que pasen de lado a lado del muro para fijar mallas en ambos lados (figura 22). Esto requiere, por supuesto, de la

perforación del muro en su espesor en varios lugares así como el relleno del hueco que queda entre el alambre y el barreno con resina epóxica o un material similar. Esta solución es más costosa que usar clavos tipo Hilti colocados con pistola, sin embargo, el comportamiento del muro es comparable. La separación máxima recomendada es de 800 mm (de la Torre, 1995).

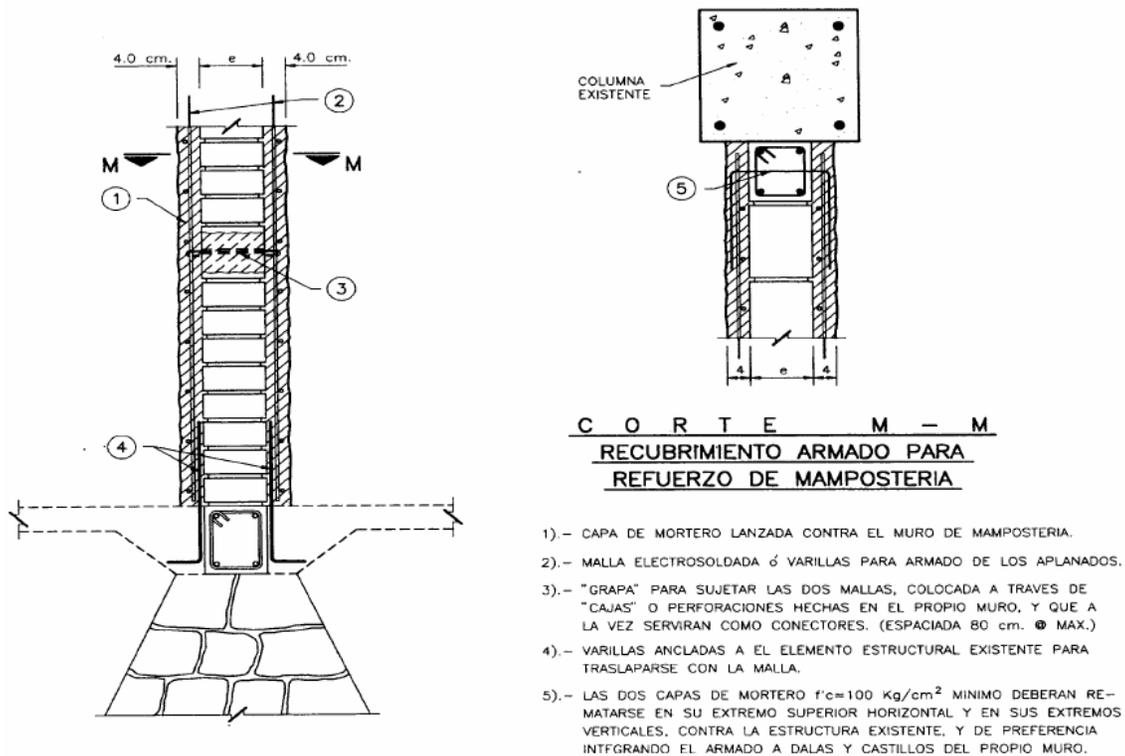


Figura 22. Recubrimiento armado para rehabilitación de mampostería (de la Torre, 1995).

Las mallas deben rodear a los castillos, esto se puede resolver traslapando la malla en forma de U que rodeará al castillo con las mallas sobre el muro. Para el traslape se siguen las recomendaciones de diseño de estructuras de concreto reforzado.

La colocación de las mallas se debe hacer en forma continua en muros ortogonales; en los cambios de dirección conviene incrementar el número de conectores. Si las mallas no se pueden doblar, debido particularmente a que son de

alto calibre, se pueden usar mallas de menor calibre traslapadas adecuadamente (figura 23). Las mallas deben rodear a las aberturas en los muros.



Figura 23. Confinamiento de un castillo con mallas metálicas que han sido traslapadas (Alcocer, 2003).

El mortero se puede colocar manualmente o bien con dispositivos neumáticos (lanzado), siguiendo los procedimientos recomendados para concreto lanzado. Se ha observado que, con una buena ejecución, muros con recubrimiento de concreto lanzado tienen una mayor resistencia y rigidez que aquéllos con mortero colocado manualmente. En cualquier caso, antes de aplicar el mortero, se debe saturar la superficie del muro.

En caso de mampostería confinada será necesario anclar las mallas a los castillos y dadas, así como recubrir estos elementos con el mortero o concreto del encamisado. Ensayes de laboratorio encaminados a evaluar la transferencia de cortante a través de interfaces de concreto nuevo y existente (Bass et al., 1989) demostraron que prácticamente cualquier tratamiento para incrementar la rugosidad de la superficie es adecuado para transmitir las fuerzas, mientras se retire la capa exterior de lechada y el polvo, así como que se exponga el agregado grueso.

Conviene que el mortero que se use para recubrir las mallas sea lo más resistente y rígido posible. Para incrementar la durabilidad del recubrimiento, se deben seguir las recomendaciones usadas para concreto, en particular lo relacionado con la graduación de la arena. Si la arena que se usa para el mortero

contiene demasiados finos, se incrementa la posibilidad de fisuramiento por contracción, lo que facilita la penetración de humedad y cloruros, y aumenta el riesgo de corrosión.

Es conveniente extender el encamisado de los muros de planta baja a los cimientos. Si es necesario reforzar estos últimos, se deben abrir cepas de tamaño suficiente para aumentar la base del cimiento, limpiando perfectamente las caras de la mampostería y quitando las piedras necesarias para formar llaves de corte con el mortero de recubrimiento. Se debe prestar atención a la impermeabilización del encamisado que esté expuesto a la humedad del terreno.

El refuerzo de muros con mallas metálicas ofrece una ventaja constructiva sobre la inserción de refuerzo horizontal: la facilidad de inspección y supervisión en obra. En efecto, se puede revisar fácilmente que la malla se haya colocado sobre el muro, aunque una vez que éste se ha cubierto con mortero, no es fácil asegurar que el anclaje se haya ejecutado adecuadamente, conviene destacar que en una estructura es probable que el número de muros reforzados con malla sea bajo, de modo que se pueda esperar una supervisión más estricta en la construcción de ellos (Alcocer, 2003).

2. ANTECEDENTES

2.1 Trabajos previos

El comportamiento de la mampostería reforzada con mallas metálicas ha sido evaluado en varias investigaciones con resultados muy buenos. A continuación se mencionan algunas pruebas experimentales y modelos realizados en México y en el extranjero que sirvieron como antecedentes para este proyecto.

2.1.1 Pruebas experimentales

Lopes (2001), estudió el uso de varios tipos de recubrimiento en el ensaye de muros de mampostería con aberturas, sujetos a flexión y compresión diagonal (figuras 24 y 25). Se observó el comportamiento estructural de muros de bloques de concreto con diferentes combinaciones de recubrimiento y refuerzo: morteros de diferentes resistencias, mallas de acero soldadas, alambres de acero, fibras de polipropileno y conectores de cortante.

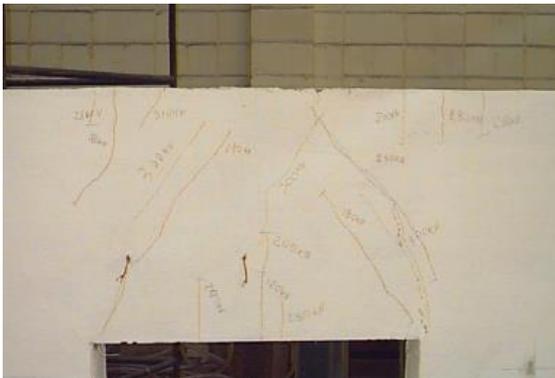


Figura 24. Agrietamiento de muro con abertura con recubrimiento de mortero (Lopes, 2001).

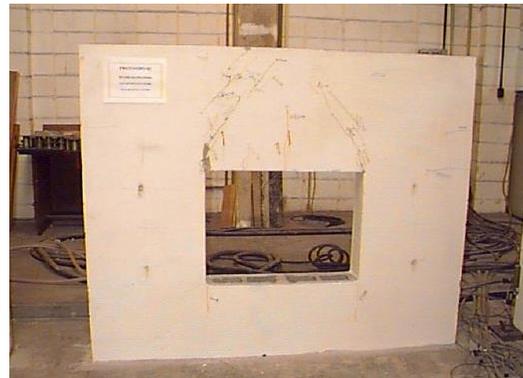


Figura 25. Agrietamiento de muro con abertura sin refuerzo (Lopes, 2001).

A partir del estudio se concluyó que los muros con cualquier tipo de recubrimiento incrementan su resistencia a cortante y que ésta se incrementa en función de la resistencia del mortero utilizado.

Flores (2003), comparó la efectividad de varias soluciones de anclajes entre recubrimiento y muro de mampostería comúnmente usadas con el objetivo de proponer nuevas alternativas (figura 26). Se verificó experimentalmente el comportamiento de los marcos con muro, con y sin recubrimiento en cuanto a su rigidez, resistencia y ductilidad (figura 27).

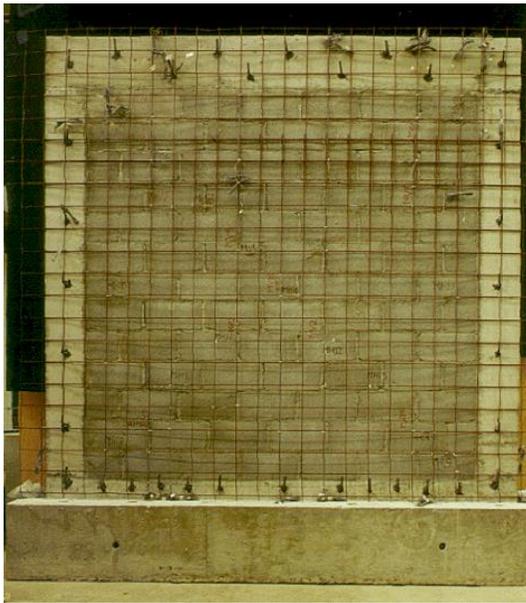


Figura 26. Muro con malla metálica y anclajes distribuidos en el marco de concreto (Flores, 2003).

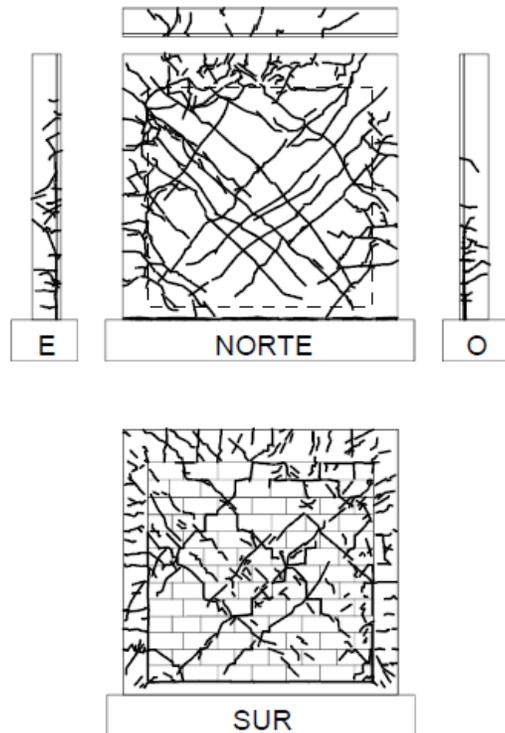


Figura 27. Agrietamiento del recubrimiento en muro con anclajes distribuidos en el marco (Flores, 2003).

Se identificaron los modos de falla y se analizó la información recopilada durante los ensayos, comparando el comportamiento de los especímenes con predicciones teóricas previamente determinadas.

Flores et al. (2004), estudiaron el comportamiento de muros de mampostería con una abertura, rehabilitados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero, sometidos a fuerzas horizontales cíclicas (figura 28). Con esta técnica de rehabilitación se incrementó la capacidad de deformación de los muros, sin embargo, una vez fracturados los alambres, la carga cayó súbitamente.

La resistencia de los modelos reparados fue de tres veces la de los especímenes originales, presentándose la falla al fracturarse los alambres de la malla.

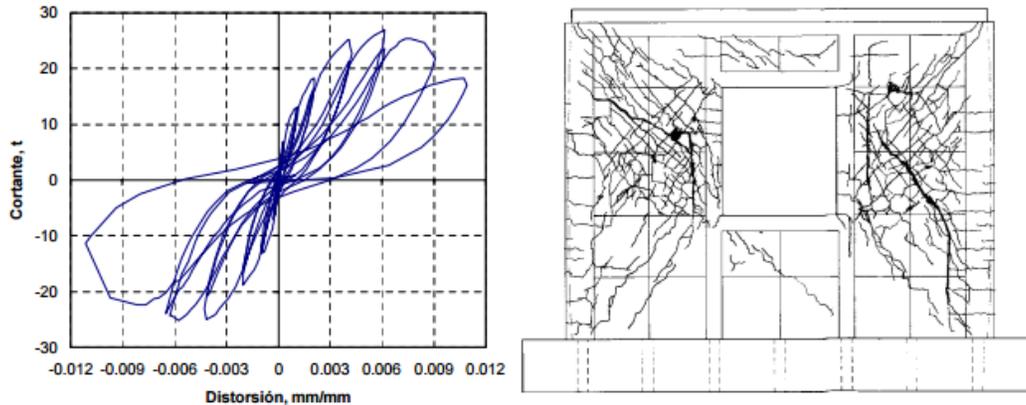


Figura 28. Curva de histéresis y patrón final de daño (Flores et al., 2004).

Juárez (2007), estudió los mecanismos de resistencia y deformación de la mampostería combinada y confinada sujeta a carga lateral cíclica (figura 29). Se ensayaron dos muros de mampostería combinada y confinada de tamaño real con las características observadas en los lugares en los que se utiliza actualmente. Las variantes entre los dos especímenes fueron la carga vertical aplicada y el orden de las hiladas de los diferentes tipos de pieza utilizados.

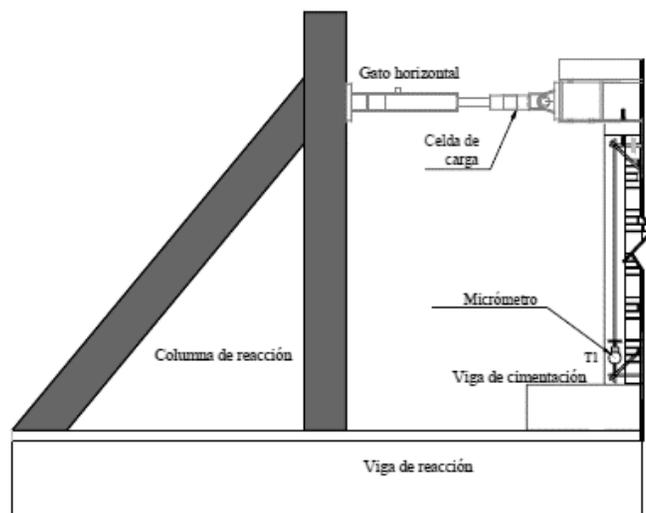


Figura 29. Ensayo de muros de mampostería sujetos a carga lateral cíclica (Juárez, 2007).

Se hizo una recopilación de información acerca de ensayos similares realizados en el CENAPRED con el objetivo de hacer una comparación de los resultados experimentales. Se compararon además parámetros como curvas de histéresis, envolventes, cargas máximas, distorsión, patrones de agrietamiento y propiedades índice de los materiales utilizados.

Alonso y Mendoza (2012), estudiaron la influencia de la cuantía de acero y el tipo de mortero de recubrimiento en la resistencia a esfuerzos cortantes de muretes de mampostería. Se utilizaron tres tipos de malla con diferentes aberturas y cuantías, y tres tipos de mortero de recubrimiento; las mallas se anclaron en las dos caras de los muretes (figura 30).



Figura 30. Murete reforzado con multimalla ferretera (Alonso y Mendoza, 2012).

Se observó que el hecho de colocar recubrimiento incrementa la resistencia a esfuerzo cortante y al colocar mallas de refuerzo se logran incrementos de hasta 20% para especímenes recubiertos con morteros tipo I y II. En este trabajo se presenta un análisis de los modos de falla y su relación con el tipo de malla utilizada.

Flores et al. (2012), hicieron ensayos en muros de mampostería rehabilitados reforzados con mortero con fibras y mortero con malla de alambre. Los muros habían sido previamente ensayados y severamente dañados ante cargas laterales cíclicas (figuras 31 y 32).

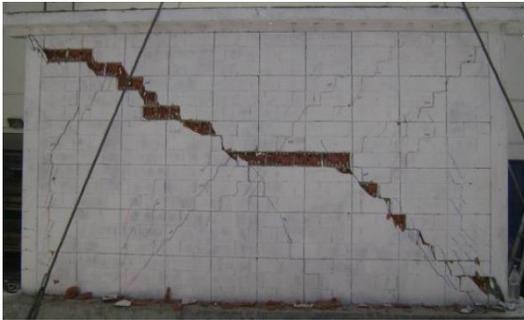


Figura 31. Estado de daño en muro sin refuerzo (Flores et al., 2012).



Figura 32. Patrón de agrietamiento final en muro rehabilitado (Flores et al., 2012).

En este estudio presentaron una comparación del desempeño de los modelos originales con los rehabilitados, en términos del comportamiento histerético, capacidad de deformación inelástica, energía disipada, degradación de rigidez y variación del tamaño de grietas con la distorsión.

Jaen (2015), estudió la correlación existente entre los resultados de ensayos en especímenes a escala y muros de tamaño real de concreto ligero ante cargas laterales (figura 33).

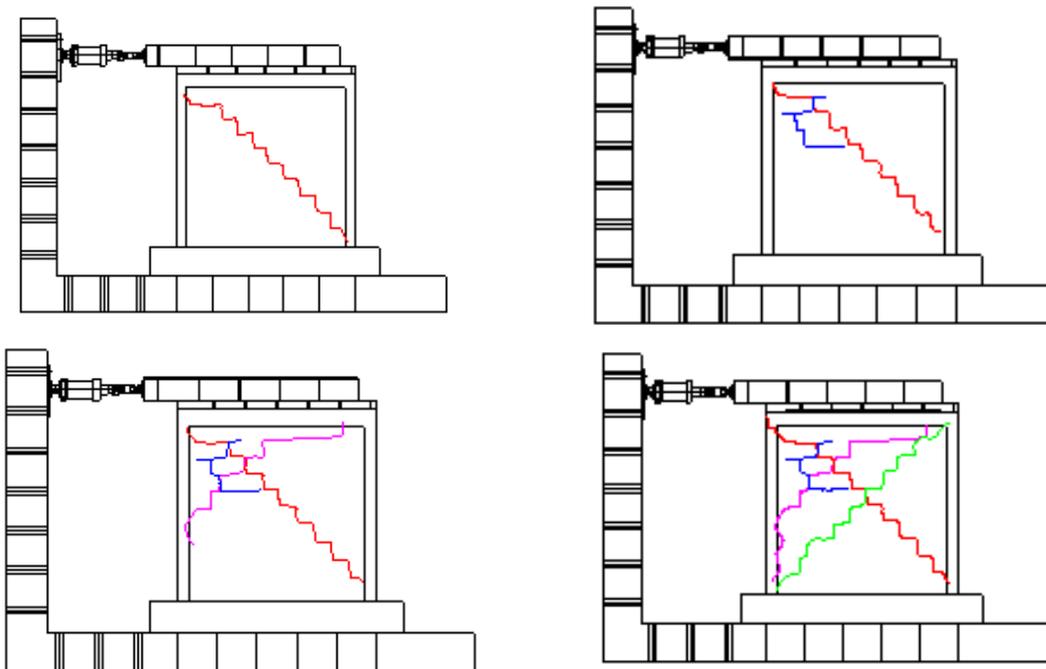


Figura 33. Aparición de grietas durante el ensaye de muro construido con piezas de block de concreto ligero (Jaen, 2015).

Se encontró que hay cierta correlación entre las pruebas índice y el comportamiento de los muros de tamaño real, sin embargo, existe un gran número de variables en la mampostería que pueden afectar los resultados, dificultando la generalización de los datos obtenidos en pruebas experimentales.

2.1.2 Modelos

Xu et al. (2011), utilizaron un modelo heterogéneo para simular el comportamiento de falla de muros de mampostería bajo carga de corte-compresión (figura 34).

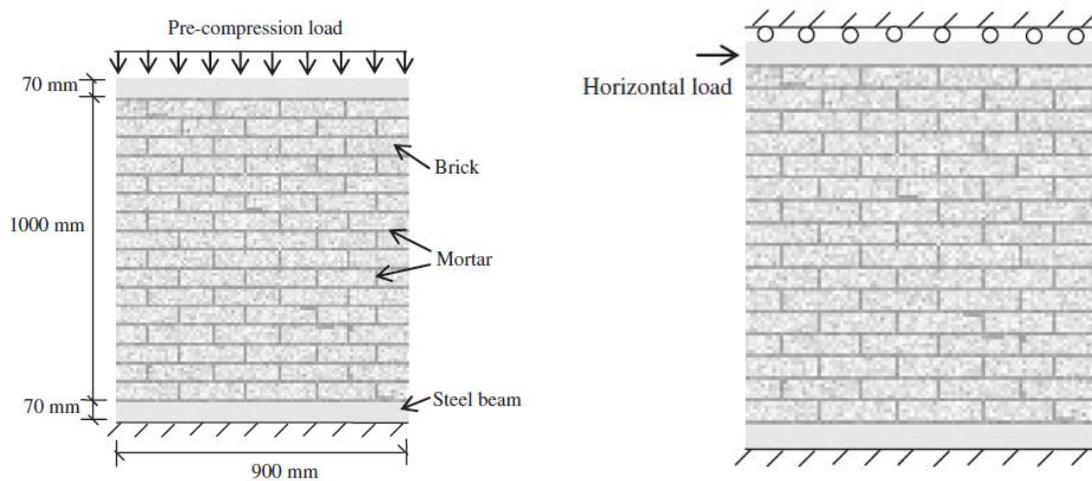


Figura 34. Modelación de muro de mampostería sujeto a carga axial y lateral (Xu et al., 2011).

Se analizaron en detalle la influencia de la heterogeneidad de los materiales de mampostería en su comportamiento de falla, los desplazamientos y las cargas máximas. Los resultados numéricos concuerdan con investigaciones experimentales.

Lizárraga y Pérez (2012), propusieron un modelo no lineal con el método de los elementos finitos para obtener la envolvente de falla de muros de mampostería simple y confinada sometidos a carga axial y lateral (figura 35). Aunque sólo se modeló la falla a tensión y a cortante, se comprobó que el modelo propuesto es una buena herramienta para conocer el comportamiento de muros de mampostería simple y confinada.

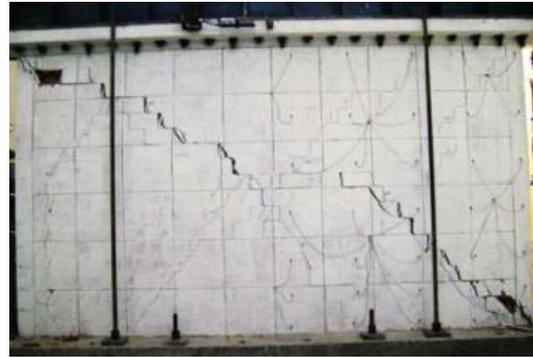
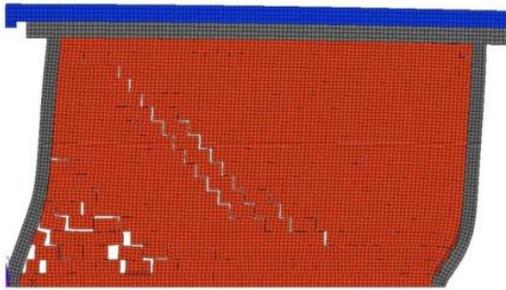


Figura 35. Resultados obtenidos a partir de la modelación con elementos finitos y pruebas experimentales (Lizárraga y Pérez, 2012).

Se concluyó que el modelo podía ser mejorado incluyendo la falla a compresión para representar de una manera más adecuada el comportamiento de la mampostería.

Psilla y Tassios (2009), estudiaron y compararon los lineamientos de diseño de varios códigos internacionales, tomando en cuenta los modos de falla y la contribución específica de los mecanismos de transferencia de fuerza, tales como la contribución de las barras de acero utilizadas como refuerzo y la resistencia a tensión y compresión de la mampostería. Utilizando una base de datos de 55 pruebas experimentales y considerando los modos de falla, propusieron cargas últimas que se compararon con las marcadas por varios códigos y con los resultados de otras investigaciones, sacando conclusiones en cuanto a su validez (figura 36).

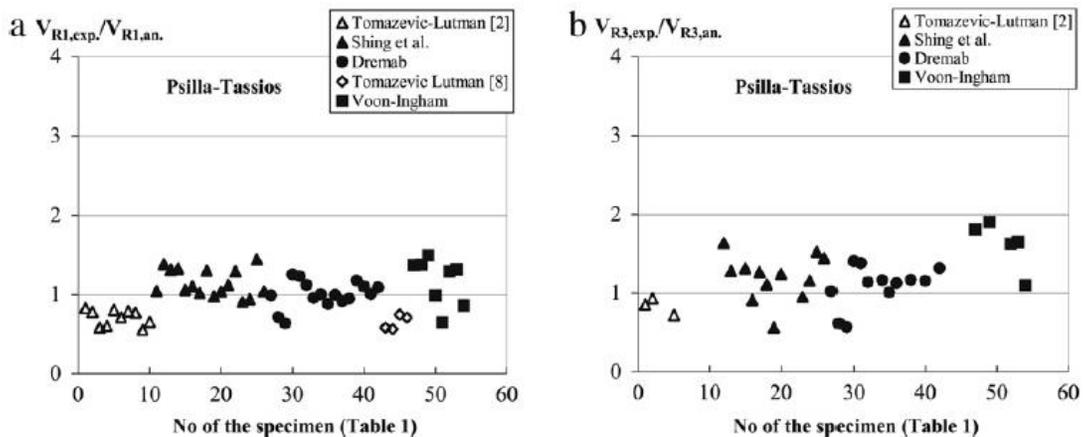


Figura 36. Predicciones teóricas comparadas con resultados experimentales en diferentes ciclos de carga (Psilla y Tassios, 2009).

2.2 Descripción del problema

Una de las técnicas más eficientes, económicas y confiables de rehabilitación de viviendas que han sufrido daño estructural es la colocación de mallas metálicas, sin embargo, la mayoría de las especificaciones marcadas en los reglamentos de construcción para el diseño de estructuras de mampostería reforzada se basan en hipótesis similares a las usadas en estructuras de concreto reforzado, en virtud de la similitud entre ambos materiales (no obstante que la mampostería es un material heterogéneo).

La resistencia a flexión de los muros de mampostería es determinada en términos de la teoría de flexión simple, para el cálculo de la resistencia a esfuerzos cortantes, las normas adoptan relaciones semiempíricas: la resistencia a cortante consiste en la suma de la resistencia aportada por la mampostería y por el refuerzo horizontal.

En México, las NTC-RCDF-2004 consideran para la fuerza cortante resistida por la mampostería, la resistencia de diseño a compresión diagonal de muretes, el área bruta de la sección transversal del muro y la carga axial actuante (que proporciona confinamiento).

Con respecto a la contribución del acero de refuerzo, estas normas solo toman en cuenta la cuantía de refuerzo horizontal y su eficiencia.

En estos lineamientos no se especifica la contribución del acero de refuerzo vertical (proporcionado por las mallas metálicas), la influencia de la adherencia entre los materiales ni la aportación ofrecida por la colocación de mallas metálicas.

En virtud de la inexistencia de normas, especificaciones o modelos que tomen en cuenta la resistencia del muro y la contribución del acero de refuerzo vertical y horizontal en la resistencia a cortante de muros de tamaño real, se buscó desarrollar una expresión que englobara todos estos parámetros y proporcionara valores más certeros con respecto a pruebas experimentales.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Plantear un modelo experimental que represente el comportamiento de muros de mampostería reforzados con mallas metálicas a partir de pruebas experimentales, que tome en cuenta la resistencia de la mampostería y la contribución del acero de refuerzo tanto horizontal como vertical.

2.3.2 Objetivos particulares

- Obtener una base de datos de las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de los muros de mampostería reforzados con mallas metálicas.
- Obtener una base de datos de los muros de tamaño real ensayados con las diferentes variables.
- Plantear un modelo experimental que represente el comportamiento de muros de tamaño real reforzados con mallas metálicas.

2.4 Hipótesis

El comportamiento de muros de mampostería reforzados con mallas metálicas se puede predecir mediante un modelo experimental que tome en cuenta la resistencia de la mampostería y la contribución del acero de refuerzo horizontal y vertical.

3. METODOLOGÍA

Para la realización de este proyecto se obtuvo una base de datos de las propiedades de los materiales utilizados para la construcción de los muros de mampostería de tamaño real. Esta base de datos comprende además los resultados de pruebas llevadas a cabo en pilas y muretes siguiendo los lineamientos marcados en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010.

Los ensayos experimentales en piezas, pilas y muretes se realizaron en una máquina Forney Testing Machines, modelo LT-1150, con capacidad de 150 toneladas (figura 37), ubicada en el Laboratorio de Geotecnia y Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.



Figura 37. Máquina universal utilizada para las pruebas en piezas, pilas y muretes.

A continuación se describen brevemente los procedimientos que se llevaron a cabo para determinar las propiedades de los materiales.

3.1 Propiedades de las piezas

Para la caracterización de las piezas se llevaron a cabo las pruebas correspondientes en base a los lineamientos y procedimientos marcados en las normas NMX-C-036-ONNCCE-2004, NMX-C-037-ONNCCE-2005, NMX-C-038-ONNCCE-2004 y NMX-C-404-ONNCCE-2005. Para el módulo de ruptura se tomó como referencia la norma ASTM-C67-91.

3.1.1 Dimensiones de las piezas

La norma NMX-C-038-ONNCCE-2004 establece el método para la determinación de las dimensiones de los tabiques, bloques y tabicones para uso estructural en edificaciones. Con respecto a las dimensiones nominales mínimas de bloques de concreto y tabicones, la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005 dice lo siguiente:

Dimensiones para bloques de concreto. Las dimensiones de las piezas deben ser modulares incluyendo la junta de albañilería y deben tener un mínimo de 10 cm de altura, 20 cm de ancho y 40 cm de largo. Las tolerancias en las dimensiones de las piezas son de ± 3 mm en la altura y ± 2 mm en el largo y ancho.

Dimensiones para tabicones. Las dimensiones nominales mínimas de las piezas deben cumplir con las siguientes medidas: alto 6 cm, ancho 10 cm y largo 24 cm. Las tolerancias en las dimensiones de las piezas deben ser de ± 3 mm en la altura y ± 2 mm en el largo y ancho.

3.1.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a compresión de las piezas se obtuvo siguiendo el procedimiento marcado en la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004, en la cual se establece el método de prueba para bloques, tabiques, tabicones y adoquines fabricados con concreto, cerámica, arcilla y otros materiales para la construcción (figura 38).



Figura 38. Ensayo a compresión en piezas de tabicón.

Para determinar la resistencia a la compresión de los bloques de concreto ligero y tabicones se seleccionaron once piezas de un lote de un millar.

La resistencia de diseño se calculó de acuerdo a la expresión marcada por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-RCDF-2004):

$$f_p^* = \frac{\bar{f}_p}{1 + 2.5c_p} \quad (1)$$

Donde:

f_p^* : Resistencia a la compresión de diseño, referida al área bruta, en MPa (kg/cm²).

\bar{f}_p : Media de la resistencia a compresión de las piezas, referida al área bruta, en MPa (kg/cm²).

c_p : Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas.

El valor del coeficiente de variación c_p no se tomará menor que 0.20 para piezas provenientes de plantas mecanizadas que cuenten con un sistema de control de calidad como el requerido en la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005, ni que 0.30 para piezas de fabricación mecanizada, pero que no cuenten con un sistema de control de calidad, ni que 0.35 para piezas de producción artesanal.

3.1.3 Absorción inicial

La norma NMX-C-404-2005 establece los límites de absorción máxima inicial de agua que deben tener las piezas de mampostería. En la tabla 8 se muestran los valores aceptados por esta norma para piezas de tabicón y bloques de concreto.

Tabla 8. Valores aceptables de absorción inicial (NMX-C-404-ONNCCE-2005).

TIPO DE PIEZA	ABSORCIÓN INICIAL (g/min)
Bloques de concreto	5
Tabicones	5

Para verificar que las piezas utilizadas cumplieran con estos valores, se determinó la cantidad de agua absorbida por los bloques de concreto ligero y los tabicones de acuerdo al método de prueba de la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005 (figura 39).



Figura 39. Prueba para determinar la absorción inicial en piezas de tabicón.

La absorción inicial se calculó con la siguiente expresión:

$$C_b = \frac{100M}{S\sqrt{t}} = \frac{100(P_1 - P_0)}{S\sqrt{10}} \quad (2)$$

Donde:

- C_b : Absorción máxima inicial, en g/min.
- M : Peso del agua, en gramos, absorbido por el bloque durante el ensaye.
- S : Superficie de la cara sumergida, en cm^2 .
- t : Tiempo de inmersión, en minutos.

3.1.4 Absorción máxima a 24 horas

De acuerdo a la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005, los valores de absorción máxima a 24 horas no deben exceder los límites establecidos por la norma NMX-C-404-ONNCCE-2004. Los valores aceptados por esta norma para piezas de tabicón y bloques de concreto se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Valores aceptables de absorción máxima a 24 horas (NMX-C-404-ONNCCE-2005).

TIPO DE PIEZA	ABSORCIÓN MÁXIMA DE AGUA EN % DURANTE 24 HORAS
Bloques de concreto	12
Tabicones	15

La absorción total en 24 horas se determinó siguiendo el procedimiento marcado por la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005 (figura 40)



Figura 40. Prueba para determinar la absorción máxima a 24 horas (Jaen, 2015).

Para calcular este valor se utilizó la ecuación:

$$A = \frac{W_{24} - W_s}{W_s} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

- A: Absorción máxima de agua a 24 horas, en porcentaje.
- W_{24} : Peso del agua absorbida después de 24 horas de inmersión, en kg.
- W_s : Peso seco de la pieza, en kg.

3.1.5 Módulo de ruptura

El módulo de ruptura de un material es el valor máximo del esfuerzo de tensión o compresión en la fibra extrema de una pieza ensayada a flexión. El procedimiento que se llevó a cabo para determinar el módulo de ruptura de las

piezas fue el establecido por la norma ASTM-C67-91. En esta prueba se midió la resistencia a tensión de los bloques de concreto ligero y los tabicones (figura 41).



Figura 41. Determinación del módulo de ruptura (Jaen, 2015).

De acuerdo con la fórmula de flexión, el módulo de ruptura se obtiene de la siguiente manera:

$$f_r = \frac{My}{I} = \frac{3 PL}{2 bt^2} \quad (4)$$

$$M = \frac{PL}{4} \quad (5)$$

Donde:

f_r : Módulo de ruptura, en kg/cm².

P : Carga de ruptura, en kg.

L : Longitud entre apoyos, en cm.

b : Ancho de la pieza, en cm.

t : Espesor de la pieza, en cm.

3.1.6 Peso volumétrico

El peso volumétrico de las piezas a utilizar se calculó de manera sencilla, obteniendo el peso seco de los especímenes en promedio y dividiéndolo entre el volumen obtenido.

Las NTC-RCDF-2004 establecen el peso volumétrico mínimo que deben tener las piezas de mampostería. Para el caso de bloques de concreto y tabicones estos valores son los mostrados en la tabla 10.

Tabla 10. Peso volumétrico neto mínimo de piezas, en estado seco (NTC-RCDF-2004).

TIPO DE PIEZA	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m³)
Bloque de concreto	1 700
Tabicón	1 500

3.2 Propiedades del mortero de pega

Para la construcción de pilas, muretes y muros de tamaño real, se utilizó un mortero tipo I de acuerdo a las proporciones de las NTC-RCDF-2004.

La resistencia a compresión del mortero se determinó de acuerdo a los lineamientos de la norma NMX-C-061-ONNCCE-2001, que establece el método de prueba para cementantes hidráulicos, por medio de especímenes cúbicos de 50 mm de lado (figura 42).



Figura 42. Ensayo de cubos de mortero (Jaen, 2015).

Se hicieron seis cubos de mortero con las dimensiones marcadas en la norma, para cada lote de pilas y muretes. Los cubos se ensayaron a los veintiocho días de su elaboración.

La resistencia de diseño se calculó con la siguiente expresión:

$$f_j^* = \frac{\bar{f}_j}{1 + 2.5c_j} \quad (6)$$

Donde:

f_j^* : Resistencia de diseño del mortero, en MPa (kg/cm²).

\bar{f}_j : Media de la resistencia a compresión de cubos de mortero, en MPa (kg/cm²).

c_j : Coeficiente de variación de la resistencia a compresión del mortero, que en ningún caso se tomará menor a 0.20.

3.3 Ensayo de pilas

En la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 se especifica el método para determinar la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto (figura 43).

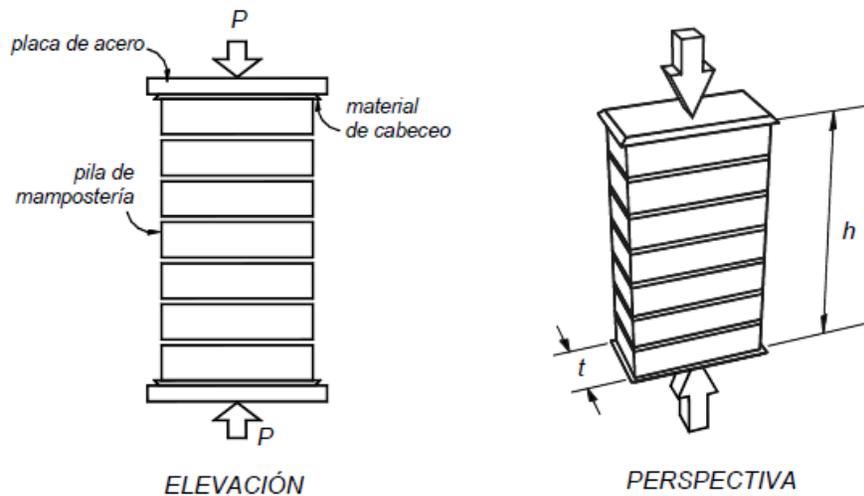


Figura 43. Pila para prueba a compresión (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

A partir de los ensayos se obtuvo la media y la desviación estándar y, con estos datos, la resistencia de diseño a compresión de la mampostería se calculó como:

$$f_m^* = \frac{\bar{f}_m}{1 + 2.5c_m} \quad (7)$$

Donde:

- f_m^* : Resistencia a compresión para fines de diseño, en MPa (kg/cm²).
- $\overline{f_m}$: Media de la resistencia a compresión de las pilas, corregida por su relación altura a espesor y referida al área bruta, en MPa (kg/cm²).
- c_m : Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las pilas de mampostería, que en ningún caso se tomará inferior a 0.15.

El módulo de elasticidad de la mampostería (figura 44) se determinó con la siguiente expresión, especificada en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010:

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (8)$$

Donde:

- E_m : Módulo de elasticidad de la mampostería, en MPa (kg/cm²).
- σ_1 : Esfuerzo axial correspondiente a 0.00005 de deformación en MPa (kg/cm²).
- σ_2 : Esfuerzo axial correspondiente al 40% de la carga máxima en MPa (kg/cm²).
- ε_2 : Deformación unitaria producida por el esfuerzo σ_2 .

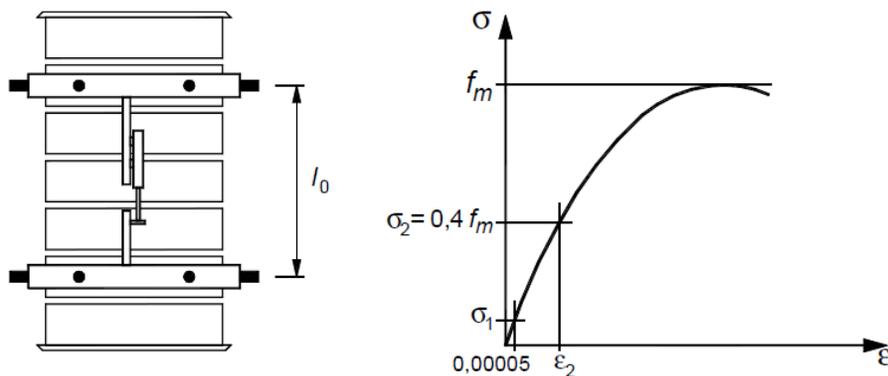


Figura 44. Determinación del módulo de elasticidad de la mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

La deformación unitaria se calculó como:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad (9)$$

Donde:

ε : Deformación unitaria.

δ : Acortamiento medido a lo largo de la longitud instrumentada, en mm.

l_0 : Longitud instrumentada, en mm, medida entre los tornillos de sujeción.

En la figura 45 se muestra el ensaye a compresión de una pila construida con piezas de tabicón.



Figura 45. Ensaye de pila construida con piezas de tabicón.

3.4 Ensaye de muretes

La resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de muretes se determinó de acuerdo a los lineamientos establecidos en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010 (figura 46).

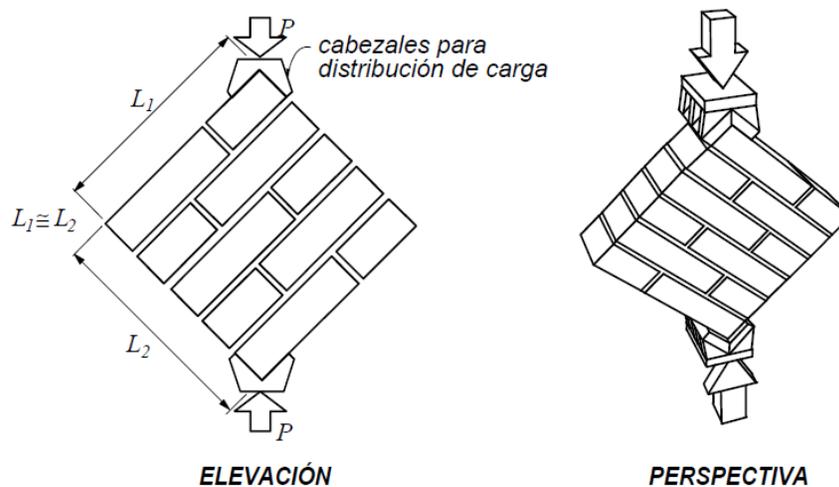


Figura 46. Murete para prueba a compresión diagonal (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

La resistencia de diseño a compresión diagonal se obtuvo con la siguiente expresión:

$$v_m^* = \frac{\overline{v}_m}{1 + 2.5c_v} \quad (10)$$

Donde:

- v_m^* : Resistencia a compresión diagonal para fines de diseño, en MPa (kg/cm²).
- \overline{v}_m : Media de la resistencia a compresión diagonal de los muretes, sobre el área bruta medida a lo largo de la diagonal paralela a la carga, en MPa (kg/cm²).
- 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 cortante de la mampostería (figura 47) se calculó con la ecuación especificada en la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010:

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (11)$$

Donde:

- G_m : Módulo de cortante, en MPa (kg/cm²).
- τ_1 : Esfuerzo cortante correspondiente a 0.00005 de deformación angular en MPa (kg/cm²).
- τ_2 : Esfuerzo cortante correspondiente al 40% de la carga máxima en MPa (kg/cm²).
- γ_2 : Deformación angular producida por el esfuerzo τ_2 .

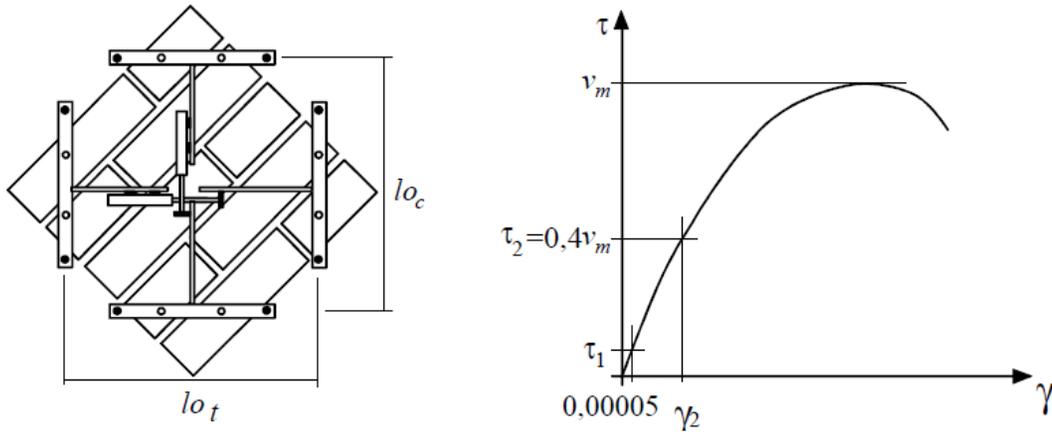


Figura 47. Obtención del módulo de rigidez a cortante de la mampostería (NMX-C-464-ONNCCE-2010).

La deformación angular se obtuvo de la siguiente manera:

$$\gamma = |\varepsilon_c| + |\varepsilon_t| \quad (12)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\delta_c}{l_{0c}} \quad (13)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\delta_t}{l_{0t}} \quad (14)$$

Donde:

ε_c : Deformación unitaria de la diagonal a compresión.

ε_t : Deformación unitaria de la diagonal a tensión.

δ_c : Acortamiento medido sobre la longitud instrumentada de la diagonal a compresión, en mm.

δ_t : Alargamiento medido sobre la longitud instrumentada marcada de la diagonal a tensión, en mm.

l_{0c} : Longitud instrumentada, en mm, medida antes del ensaye, de la diagonal a compresión medida entre los tornillos de sujeción.

l_{0t} : Longitud instrumentada, en mm, medida antes del ensaye, de la diagonal a tensión medida entre los tornillos de sujeción.

En la figura 48 se muestra el patrón de falla de un murete construido con piezas de block de concreto ligero, ensayado a compresión diagonal.



Figura 48. Ensayo de murete construido con piezas de block de concreto ligero.

3.5 Ensayo de muros de tamaño real

En esta investigación se obtuvo una base de datos de los resultados de pruebas experimentales llevadas a cabo en 6 muros de mampostería confinada sometidos a carga lateral variando el tipo de pieza y las características del refuerzo. Los tipos de refuerzo utilizados durante las pruebas en los muros se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Características del refuerzo utilizado durante los ensayos en muros.

BLOCK DE CONCRETO LIGERO	TABICÓN
Muro testigo sin refuerzo	Muro testigo sin refuerzo
Muro testigo rehabilitado con multimalla ferretera simétrica (5 x 5 cm)	Muro testigo rehabilitado con multimalla ferretera simétrica (5 x 5 cm)
Muro reforzado con multimalla ferretera cuadrada (5 x 5 cm)	Muro reforzado con multimalla ferretera cuadrada (5 x 5 cm)

La base de datos que comprende los resultados de muros testigo sin refuerzo y muros testigo rehabilitados, se obtuvo de las investigaciones presentadas por Jaen (2015) y Romero (2015), respectivamente.

3.5.1 Geometría de los muros

Los muros ensayados durante las pruebas experimentales se construyeron con dimensiones de 2.50 x 2.50 m de ancho y longitud, incluyendo 10 cm de losa, con castillos de 15 x 15 cm (figura 49).

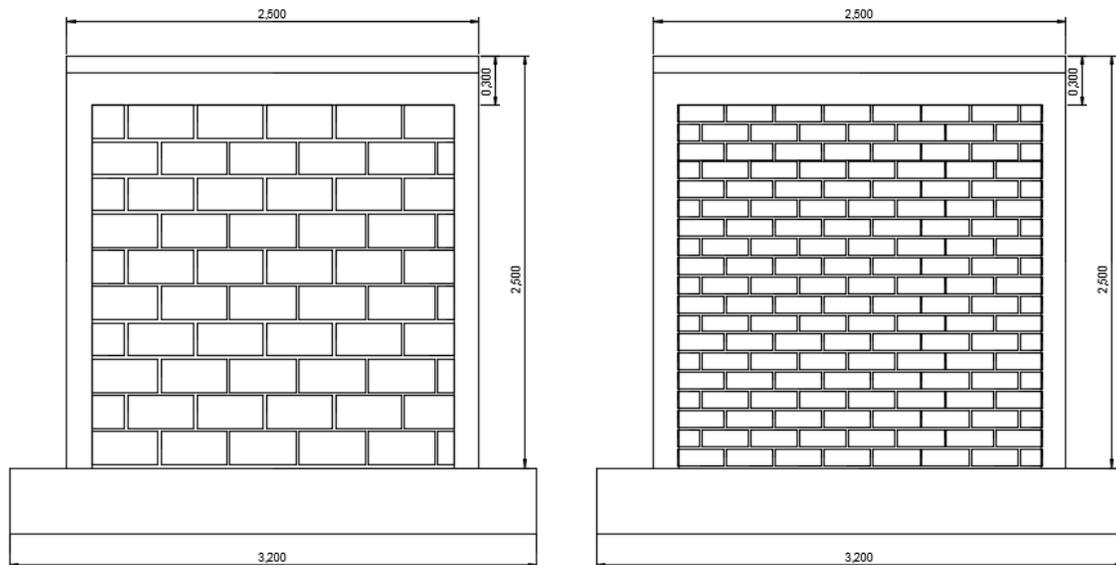


Figura 49. Dimensiones de los muros ensayados (Jaen, 2015).

Se construyó también una dala de cimentación independiente con dimensiones de 80 x 40 cm, con el fin de proporcionar anclaje a las barras de los castillos y una condición teórica de empotramiento en su base (figura 50).

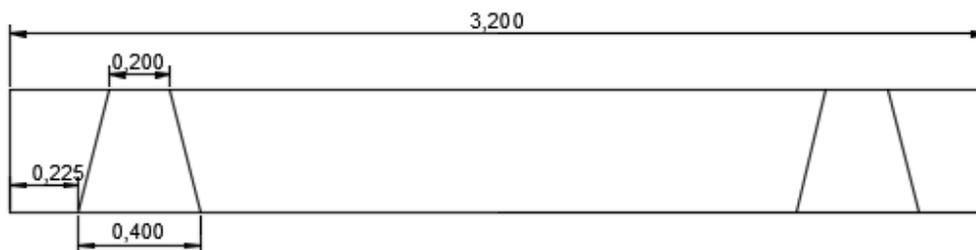


Figura 50. Dimensiones de la dala de cimentación (Jaen, 2015).

En la parte superior se construyó una losa de 55 cm de ancho por 10 cm de peralte para la conexión al marco de carga y transmisión de las fuerzas cortantes, esta losa sobresalía 20 cm a cada lado para dar una condición de muro interno.

3.5.2 Armado de los muros

En la dala de cimentación se usaron estribos del No. 3 a cada 15 cm y ocho varillas del No. 8 para soportar los esfuerzos cortantes producidos durante la prueba (figura 51).

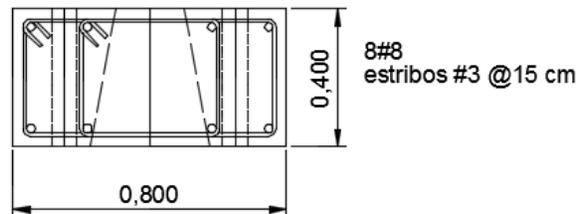


Figura 51. Características del armado de la dala de cimentación (Jaen, 2015).

La losa se reforzó con estribos del No. 2 y ganchos del No. 3 a cada 15 cm con seis varillas del No. 3 (figura 52).

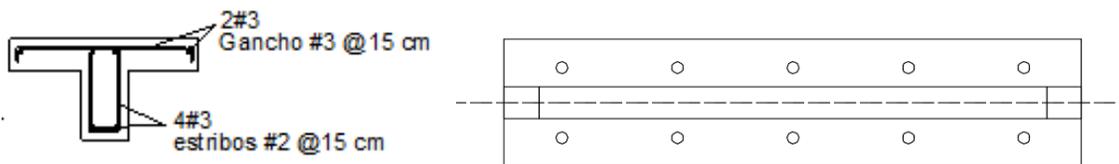


Figura 52. Características del armado de la losa (Jaen, 2015).

Los castillos se construyeron con refuerzo convencional, utilizando cuatro varillas del No. 3 y estribos del No. 2 a cada 15 cm, con el fin de proporcionar rigidez al muro durante la prueba.

3.5.3 Construcción de los muros

La dala de cimentación se construyó con un concreto de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y se enganchó al muro de reacción por medio de diez anclajes en forma de tornillo.

Se desplantó el armado de los castillos sobre la dala para después empezar a colocar las hiladas de block de concreto o tabicón, según fuera el caso. Una vez que las hiladas alcanzaron una altura de 1.3 m, se colocó la cimbra de los castillos y después se continuó con las hiladas hasta su altura máxima.

Cuando se terminaron las hiladas se colaron los castillos con un concreto de 150 kg/cm^2 , con un revenimiento alto para garantizar su penetración en el armado.

Terminados los castillos, se colocó el armado de la losa y se continuó con la cimbra y su colado. Para la losa se utilizó un concreto de resistencia $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$.

3.5.4 Instrumentación

La instrumentación de los muros se realizó por medio de micrómetros digitales, durante la realización de los ensayos se registraron las mediciones de la deformación en las diagonales sobre las dos caras del muro (figura 53).



Figura 53. Instrumentación de los muros (Romero, 2015).

De igual manera, se registró la deformación producida en los extremos del muro, para esto se tomaron dos medidas, una en la base (figura 54) y otra en la losa (figura 55) para medir el desplazamiento lateral.



Figura 54. Medición de desplazamientos en la dala de cimentación.



Figura 55. Medición de desplazamientos en la losa.

3.5.5 Dispositivo de aplicación de cargas

La metodología seguida para la realización de las pruebas experimentales fue la utilizada por Jaen (2015). Los muros fueron ensayados en el muro de reacción ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (figura 56).

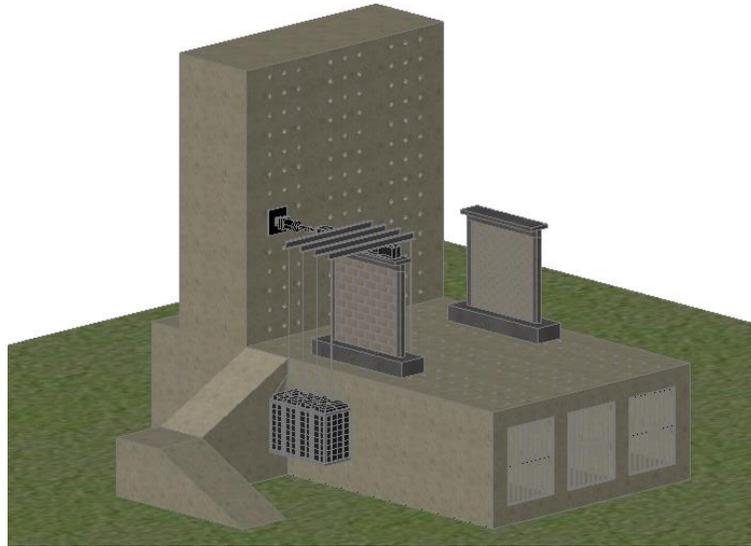


Figura 56. Ensaye de especímenes en el muro de reacción.

Para la realización de las pruebas se utilizó un sistema hidráulico marca Gicelo, modelo T10 E2 26005 P2C, con flujo de 6 GPM y presión de 1 800 PSI (figura 57). Con este sistema se aplicaron cargas horizontales cíclicas reversibles en el plano de los muros mediante una viga de acero con el fin de evitar concentraciones de esfuerzos en la esquina superior (figuras 58 y 59).



Figura 57. Sistema hidráulico utilizado para aplicación de carga horizontal.



Figura 58. Viga utilizada durante los ciclos de carga.



Figura 59. Aplicación de cargas horizontales.

Durante los ensayos se aplicó a los muros carga vertical por medio de un contrapeso, el cual se sostuvo con una canastilla que transmitió 600 kg apilando piezas de block de concreto ligero (figura 60).



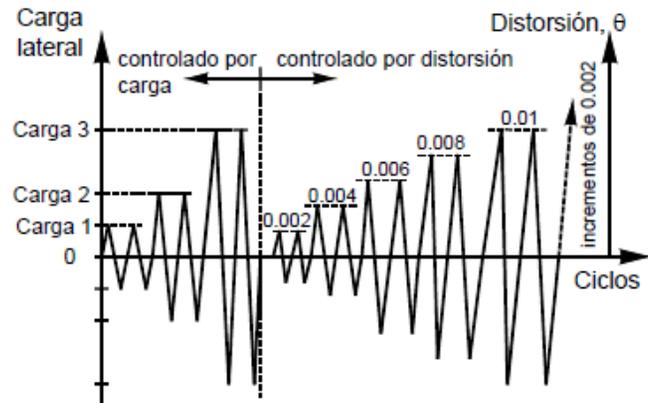
Figura 60. Contrapeso utilizado para aplicación de carga vertical.

Con esta carga, multiplicada por el brazo de palanca, se aplicaron 10 toneladas de carga vertical. Dividiendo este valor entre el área transversal del muro, resulta un esfuerzo vertical de 2.5 kg/cm^2 , que equivale a la carga que estaría soportando un muro de planta baja en una construcción de tres o cuatro niveles.

Este sistema se utilizó debido a la falta de gatos verticales para la compresión.

3.5.6 Historia de carga

Los ensayos realizados en los muros se hicieron de acuerdo al protocolo marcado en el apéndice A de las NTC-RCDF-2004 (figura 61).



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 61. Historia de carga (NTC-RCDF-2004).

Las pruebas se harán bajo una carga vertical constante que represente las acciones permanentes del reglamento consistentes con el uso que se pretende dar al sistema constructivo. Para cada distorsión se aplicarán dos ciclos. Los dos primeros pares de ciclos se aplicarán controlando por carga, y corresponderán a la cuarta parte y a la mitad de la menor de la carga calculada de agrietamiento inclinado del muro o de fluencia del refuerzo vertical. El tercer par de ciclos corresponderá al primer agrietamiento inclinado o a la primera fluencia del muro, lo que ocurra primero. A partir de ahí se aplicarán las distorsiones de la figura 61 hasta

alcanzar, al menos, una distorsión de 0.006 si se usan piezas macizas o de 0.004 si se usan piezas huecas (NTCM-RCDF-2004, apéndice A).

3.6 Planteamiento del modelo propuesto

La gran cantidad de variables que interviene en el comportamiento mecánico de la mampostería dificulta cualquier intento de establecer una ecuación para predecir su resistencia a cortante bajo carga axial y lateral.

El objetivo principal de esta investigación fue el planteamiento inicial de un modelo con el cual se pudiera predecir el comportamiento de muros de mampostería reforzados con mallas metálicas bajo carga axial y lateral.

Para la deducción del modelo se tomaron en cuenta los patrones de falla observados durante los ensayos de muros de tamaño real, principios básicos de mecánica de materiales y recomendaciones de otros autores.

3.7 Validación del modelo propuesto

Como parte de esta investigación se validó el modelo propuesto con los resultados de las pruebas experimentales llevadas a cabo en los muros de tamaño real construidos con los dos tipos de pieza.

De igual manera, se hizo una comparación con una base de datos que se obtuvo de otras investigaciones en las que ha sido estudiada la eficiencia de la colocación de mallas metálicas como técnica de rehabilitación y refuerzo de muros de mampostería.

3.7.1 Comparación con resultados de pruebas experimentales

En esta etapa de la validación se compararon los valores obtenidos en los ensayos de los muros con los teóricos calculados a partir del modelo propuesto, tomando en cuenta las características de los especímenes.

Adicionalmente, se obtuvo la resistencia de diseño de los muros ensayados usando las expresiones marcadas por las NTC-RCDF-2004 para comparar la

aproximación de los resultados del modelo con los que se tienen siguiendo estos lineamientos.

$$V_{mR} = F_R(0.5v_m^*A_T + 0.3P) \quad (15)$$

$$V_{sR} = F_R\eta\rho_h f_{yh}A_T \quad (16)$$

Donde:

- V_{mR} : Fuerza cortante resistida por la mampostería (kg).
- V_{sR} : Fuerza cortante resistida por el acero de refuerzo horizontal (kg).
- F_R : Factor de resistencia igual a 0.7.
- A_T : Área bruta de la sección transversal del muro o segmento del muro, que incluye a los castillos (cm²).
- v_m^* : Resistencia a compresión diagonal para fines de diseño (kg/cm²).
- P : Carga axial total que obra sobre el muro (kg).
- η : Factor de eficiencia del refuerzo horizontal.
- ρ_h : Cuantía de acero de refuerzo horizontal en el muro.
- f_{yh} : Esfuerzo especificado de fluencia del acero de refuerzo horizontal o malla de alambre soldado (kg/cm²).

El factor de eficiencia del refuerzo horizontal (η) se determina con el siguiente criterio:

$$\eta = \begin{cases} 0.6; & \text{si } \rho_h f_{yh} \leq 6 \text{ kg/cm}^2 \\ 0.2; & \text{si } \rho_h f_{yh} \geq 9 \text{ kg/cm}^2 \end{cases}$$

Para valores de $\rho_h f_{yh}$ comprendidos entre 6 y 9 kg/cm², η se hará variar linealmente.

3.7.2 Comparación con datos recabados de otras investigaciones

La segunda parte de la validación consistió en hacer una recopilación de datos obtenidos de estudios experimentales y hacer una comparación de éstos con valores teóricos calculados con el modelo propuesto.

Al igual que en la sección anterior, para cada caso se contrastaron las predicciones teóricas con la resistencia de diseño de las NTC-RCDF-2004.

De manera breve, se mencionan a continuación las investigaciones que se consideraron para obtener la base de datos utilizada en esta etapa de la validación.

Alcocer et al. (1996) hicieron ensayos en especímenes cuadrados de tamaño real contruidos con tabique rojo recocido de arcilla para evaluar experimentalmente la factibilidad del encamisado como opción para incrementar la resistencia a cortante de muros de mampostería confinada.

Flores et al. (2004), hicieron pruebas en muros de piezas macizas de arcilla, con abertura al centro, previamente dañados y rehabilitados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero. El primer modelo, MV-1, no contaba con refuerzo en la abertura, mientras que al espécimen MV-2 se le colocaron castillos y dalas de cerramiento alrededor de la misma.

En la investigación mencionada, se observó que no hubo diferencia notable en el comportamiento de los dos muros durante la primera etapa de las pruebas, con lo cual se comprobó que el cortante de agrietamiento no depende de la presencia de los castillos, y que éstos contribuyen en la siguiente etapa, incrementando su resistencia y proporcionando capacidad de deformación.

Velázquez et al. (2010) ensayaron dos muros de mampostería confinada, con abertura en el centro, contruidos con piezas de block y mortero tipo III. Los especímenes estudiados, MSR-1 y MCR-2, se construyeron sin y con refuerzo alrededor de la abertura, respectivamente.

Los dos últimos estudios mencionados se tomaron en cuenta para observar la influencia que tiene en los resultados el hecho de que los muros cuenten con una abertura al centro o que la malla esté colocada directamente sobre la mampostería, como es el caso de la investigación realizada por Flores et al. (2004).

Como parte complementaria, se consideraron datos recabados de los trabajos presentados por Pineda y Alcocer (2004) y Flores et al. (2012). En ambos

casos hay variables que es necesario estudiar con la realización de pruebas experimentales con el fin de mejorar el modelo propuesto en esta investigación.

Pineda y Alcocer (2004) realizaron ensayos en cuatro muros de mampostería confinada construidos con piezas de tabique macizo de arcilla, reforzados con malla de alambre soldado utilizando diferentes cuantías y tipos de anclaje. En los especímenes estudiados, la malla se colocó completamente adosada al muro.

Flores et al. (2012) repararon dos muros de mampostería de piezas huecas multiperforadas de arcilla extruida, usando mortero con fibras y mortero con malla de alambre. Con los datos obtenidos de este estudio se hizo una comparación de la influencia que tienen las características de la pieza utilizada en la capacidad de carga que conservan los muros después de la rehabilitación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la base de datos obtenida de la investigación hecha por Jaen (2015) y los resultados de las pruebas realizadas en pilas y muretes elaborados con las piezas de tabicón y block de concreto ligero utilizadas para la construcción de los muros de tamaño real, se hizo una comparación con los valores especificados en las normas correspondientes.

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos durante las pruebas, mostrando también los límites mínimos o máximos marcados en las normas para cada caso.

4.1 Propiedades de los materiales

En la tabla 12 se presentan las dimensiones obtenidas siguiendo el procedimiento establecido por la norma NMX-C-038-ONNCCE-2004 para los dos tipos de pieza utilizados (figura 62).

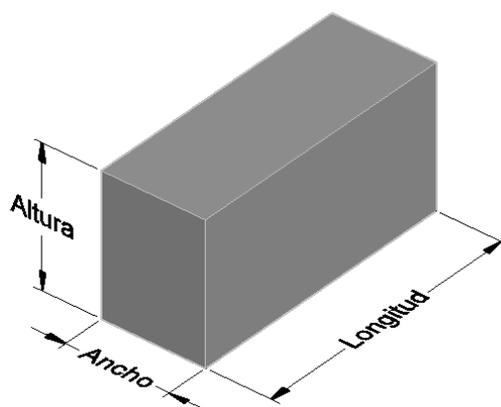


Figura 62. Dimensiones de las piezas.

Tabla 12. Dimensiones obtenidas en las piezas de tabicón y block de concreto ligero.

MATERIAL	ANCHO (cm)	ALTURA (cm)	LONGITUD (cm)
Tabicón	13.94	9.93	27.83
Block de concreto ligero	15.07	19.86	39.92

Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión de diseño de las piezas se muestran en la tabla 13. La prueba se repitió para las piezas de tabicón, debido a que la forma en que se aplicó la carga en el trabajo realizado por Jaen (2015), no correspondía a lo especificado en la norma NMX-C-036-ONNCCE-2004.

Tabla 13. Resistencia a compresión de diseño.

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE DISEÑO (kg/cm ²)	NMX-C-404-ONNCCE-2005 (kg/cm ²)
Tabicón	26.85	100
Block de concreto ligero	51.23	60

Puede verse que los resultados obtenidos para los dos tipos de pieza están por debajo de los valores mínimos de la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005.

En las tablas 14 y 15 se presentan los resultados de las pruebas de absorción inicial y absorción máxima a 24 horas.

Tabla 14. Absorción inicial.

MATERIAL	ABSORCIÓN INICIAL (g/min)	NMX-C-404-ONNCCE-2005 (g/min)
Tabicón	38.07	5
Block de concreto ligero	14.38	5

Tabla 15. Absorción máxima a 24 horas.

MATERIAL	ABSORCIÓN MÁXIMA A 24 HORAS (%)	NMX-C-404-ONNCCE-2005 (%)
Tabicón	14.53	15
Block de concreto ligero	23.01	12

En este caso también se repitieron las pruebas para las piezas de tabicón debido a que la manera de acomodar los especímenes fue diferente a los lineamientos marcados en la norma NMX-C-037-ONNCCE-2005.

Los valores obtenidos para absorción inicial en los dos tipos de pieza y absorción máxima a 24 horas en block de concreto ligero, superan los límites especificados por la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005, quedando únicamente la absorción máxima a 24 horas en el tabicón por debajo del máximo establecido.

En las tablas 16, 17 y 18 se muestran los resultados de las pruebas del módulo de ruptura, pesos volumétricos y resistencia a compresión del mortero.

Tabla 16. Módulo de ruptura.

MATERIAL	MÓDULO DE RUPTURA (kg/cm ²)	NMX-C-404-ONNCCE-1997 (kg/cm ²)
Tabicón	30.98	8
Block de concreto ligero	20.65	5

Tabla 17. Peso volumétrico.

MATERIAL	PESO VOLUMÉTRICO (kg/m ³)	NTC-RCDF-2004 (kg/m ³)
Tabicón	1 220	1 500
Block de concreto ligero	1 120	1 700

Tabla 18. Resistencia de diseño del mortero.

RESISTENCIA DE DISEÑO DEL MORTERO (kg/cm ²)	NTC-RCDF-2004 (kg/cm ²)
76.03	125

Se puede observar que el módulo de ruptura cumple con las condiciones que establecía la norma NMX-C-404-ONNCCE-1997. En la última actualización de ésta (2005), no se indican los valores que se deben cumplir pero se utilizó la versión de 1997 como referencia.

El peso volumétrico obtenido para los dos tipos de pieza resultó estar por debajo de los mínimos especificados en las NTC-RCDF-2004.

En el caso de las piezas de block, el bajo peso volumétrico que se obtuvo se puede explicar con el hecho de que en la región de Querétaro se utiliza concreto ligero para su elaboración, diferente al utilizado para las piezas de block sólido consideradas en las normas mencionadas.

Las piezas de tabicón presentan una menor variación respecto al valor mínimo establecido, pudiéndose considerar aceptable tomando en cuenta la diferencia que tienen las características de la materia prima utilizada de una región a otra.

Debe tenerse en cuenta que las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-RCDF-2004), y las establecidas por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), especifican los valores que se deben cumplir en todas estas pruebas tomando como referencia las características de los materiales que se encuentran en la región del Distrito Federal.

La resistencia de diseño del mortero tipo I utilizado no cumplió con el valor esperado de 125 kg/cm². Jaen (2015), atribuye esto a que al momento de su elaboración, el trabajador agrega una cantidad mayor de agua a la mezcla para mejorar su manejabilidad. Por otra parte, se ha observado en otros estudios que es muy difícil alcanzar este valor aun en las condiciones más favorables con las proporciones de las NTC-RCDF-2004.

La base de datos completa que comprende las propiedades de los materiales utilizados para la construcción de pilas, muretes y muros de tamaño real se encuentra en el apéndice A.

4.2 Ensaye de pilas y muretes

Los ensayos realizados en pilas y muretes construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero, se hicieron siguiendo los lineamientos establecidos por la norma NMX-C-464-ONNCCE-2010.

En las tablas 19 y 20 se muestran los resultados del ensaye a compresión de pilas construidas con los dos tipos de pieza.

Tabla 19. Resistencia a compresión de pilas.

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PILAS (kg/cm²)	NTC-RCDF-2004 (kg/cm²)
Tabicón	57.59	20
Block de concreto ligero	43.49	20

Tabla 20. Módulo de elasticidad.

MATERIAL	MÓDULO DE ELASTICIDAD (kg/cm²)	NTC-RCDF-2004 (kg/cm²)
Tabicón	31 580.68	46 056
Block de concreto ligero	29 393.19	34 792

Puede verse que la resistencia de diseño a compresión de pilas en ambos materiales cumple con los valores establecidos en las NTC-RCDF-2004, correspondientes al mortero tipo I utilizado. En el caso del módulo de elasticidad, los resultados obtenidos en las pruebas quedan por debajo de los valores señalados en estas normas.

En las tablas 21 y 22 se presentan los resultados obtenidos durante las pruebas a compresión diagonal realizadas en muretes construidos con los dos tipos de pieza.

Tabla 21. Resistencia a compresión diagonal de muretes.

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DIAGONAL DE MURETES (kg/cm ²)	NTC-RCDF-2004 (kg/cm ²)
Tabicón	3.05	3
Block de concreto ligero	3.88	3.5

Tabla 22. Módulo de cortante.

MATERIAL	MÓDULO DE CORTANTE (kg/cm ²)	NTC-RCDF-2004 (kg/cm ²)
Tabicón	27 972.61	12 632.27
Block de concreto ligero	29 212.03	11 757.28

La resistencia de diseño calculada para los dos materiales cumple con los valores especificados en las NTC-RCDF-2004. El módulo de cortante también cumple con los límites establecidos en estas normas, pero en este caso hubo algunos resultados que presentaron una dispersión muy grande con respecto a la media, por lo que los valores mostrados en la tabla 22 pueden variar si se omiten los datos que se alejan del promedio. El objetivo principal de esta investigación no es la determinación de las propiedades índice de los materiales, por esta razón se presentan los resultados completos obtenidos durante las pruebas sin eliminar alguno.

La base de datos completa de los ensayos realizados en pilas y muretes construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero está en el apéndice B.

4.3 Ensaye de muros testigo sin refuerzo

En la tabla 23 se resumen los datos principales obtenidos del ensaye de los muros testigo sin refuerzo construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero (figuras 63 y 64).

Los resultados están agrupados en dos categorías: la carga de agrietamiento reportada en los registros de cada ensaye (V_{Agr}) y la resistencia máxima ($V_{Máx}$), es decir, la máxima fuerza cortante registrada en los dos muros.

Para cada valor de la fuerza cortante se indica la deformación angular correspondiente calculada con los registros de los micrómetros utilizados en las pruebas.

Tabla 23. Resultados de las pruebas en muros testigo sin refuerzo.

MATERIAL	AGRIETAMIENTO		CORTANTE MÁXIMO	
	V_{Agr} (kg)	γ_{Agr} (mm/mm)	$V_{Máx}$ (kg)	$\gamma_{Máx}$ (mm/mm)
Tabicón	9 087	0.00103	11 420	0.00325
Block de concreto ligero	7 300	0.00146	11 300	0.00379



Figura 63. Prueba en muro testigo sin refuerzo construido con piezas de tabicón (Jaen, 2015).



Figura 64. Prueba en muro testigo sin refuerzo construido con piezas de block de concreto ligero (Jaen, 2015).

En las figuras 65 y 66 se presentan las envolventes de respuesta de los dos muros, obtenidas a partir de los datos de las pruebas experimentales.

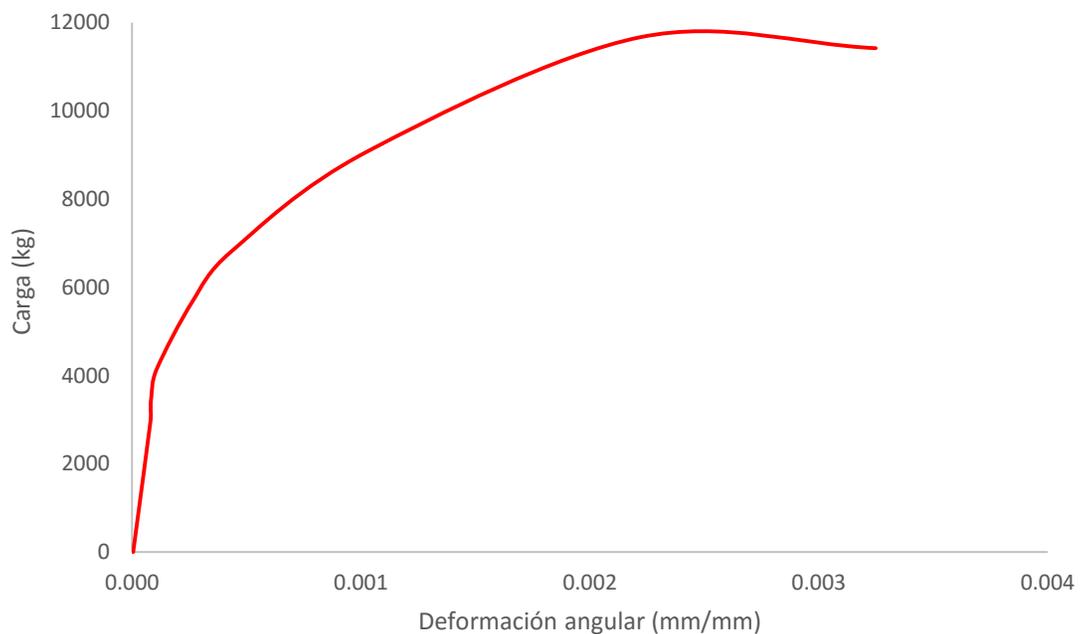


Figura 65. Envolvente de respuesta de muro testigo sin refuerzo construido con piezas de tabicón.

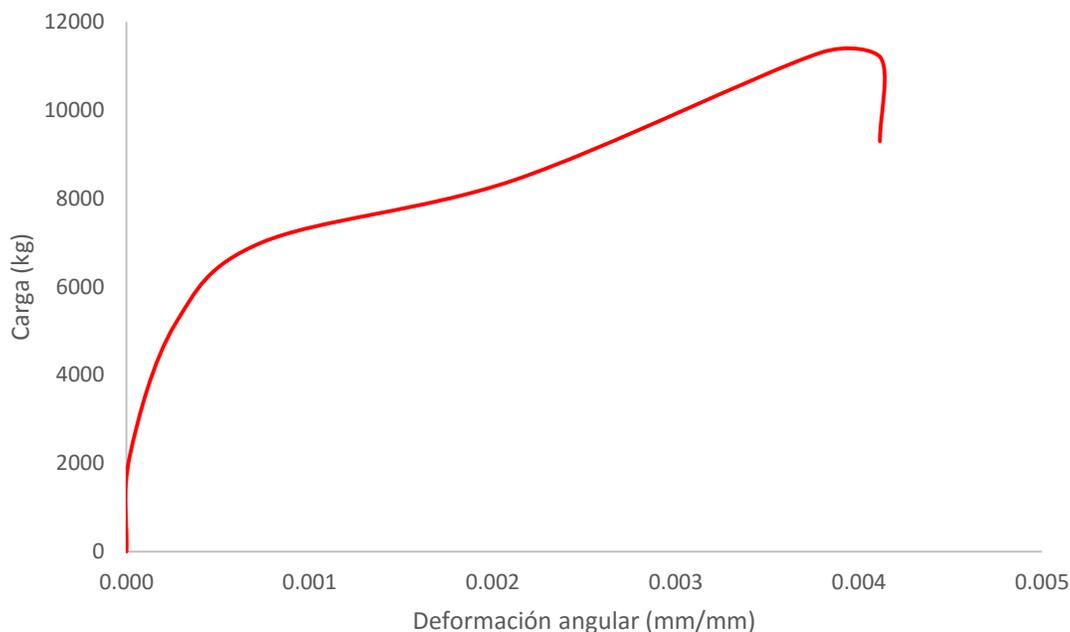


Figura 66. Envoltorio de respuesta de muro testigo sin refuerzo construido con piezas de block de concreto ligero.

Las curvas de histéresis de los muros testigo sin refuerzo construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero se muestran en el apéndice C.

4.4 Ensayo de muros testigo rehabilitados

En la tabla 24 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de muros testigo rehabilitados, construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero.

Tabla 24. Resultados de las pruebas en muros testigo rehabilitados.

MATERIAL	AGRIETAMIENTO		CORTANTE MÁXIMO	
	V _{Agr} (kg)	γ _{Agr} (mm/mm)	V _{Máx} (kg)	γ _{Máx} (mm/mm)
Tabicón	11 800	0.00130	19 700	0.00649
Block de concreto ligero	13 800	0.00154	21 500	0.00949

Al igual que en la sección anterior, los datos están agrupados en dos categorías, mostrando la carga de agrietamiento (V_{Agr}) y la máxima fuerza cortante registrada ($V_{Máx}$), con las correspondientes deformaciones angulares calculadas con los registros de la base de datos.

Los muros estudiados durante esta etapa fueron los mismos que se ensayaron en el trabajo presentado por Jaen (2015), ahora rehabilitados con multimalla ferretera simétrica y recubrimiento de mortero de 2 cm (figuras 67 a 70).

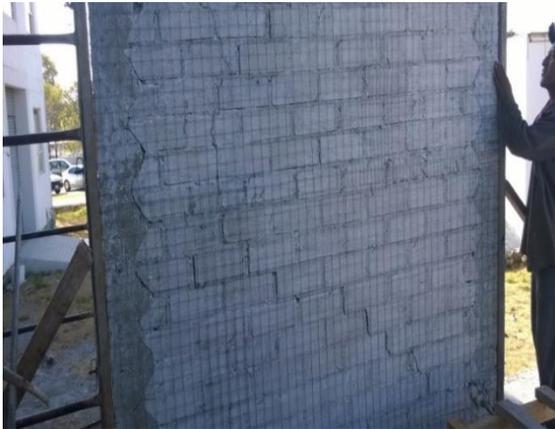


Figura 67. Colocación de multimalla ferretera en muro construido con tabicón (Romero, 2015).



Figura 68. Recubrimiento con mortero en muro rehabilitado construido con tabicón (Romero, 2015).



Figura 69. Colocación de multimalla ferretera en muro construido con block de concreto ligero (Romero, 2015).



Figura 70. Recubrimiento con mortero en muro rehabilitado construido con block de concreto ligero (Romero, 2015).

En las figuras 71 y 72 se muestran las envolventes de respuesta de los dos muros rehabilitados.

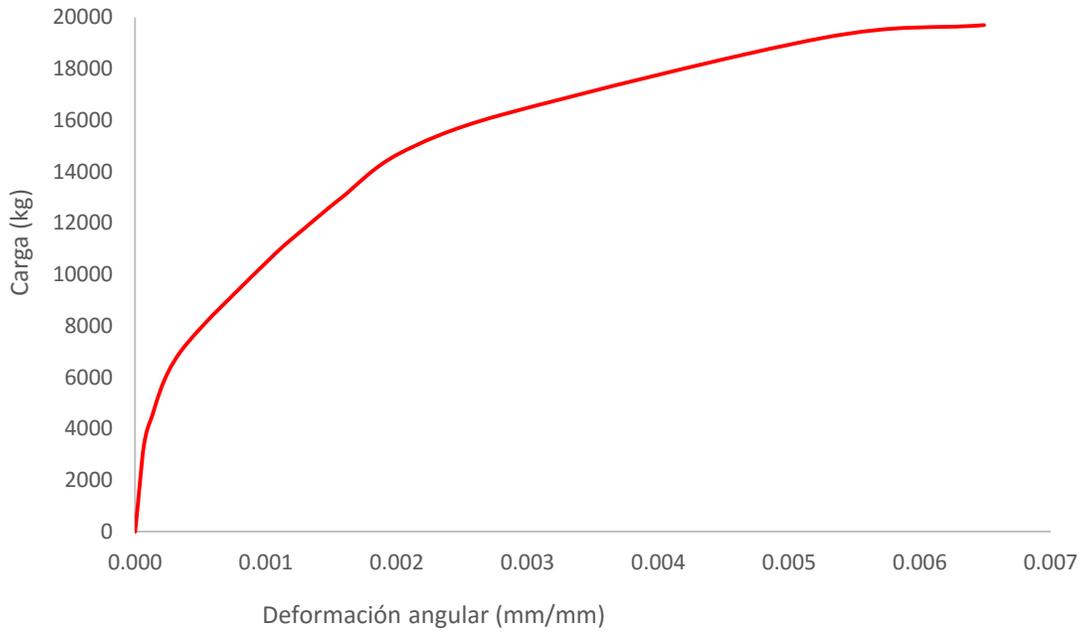


Figura 71. Envolvente de respuesta de muro testigo rehabilitado construido con piezas de tabicón.

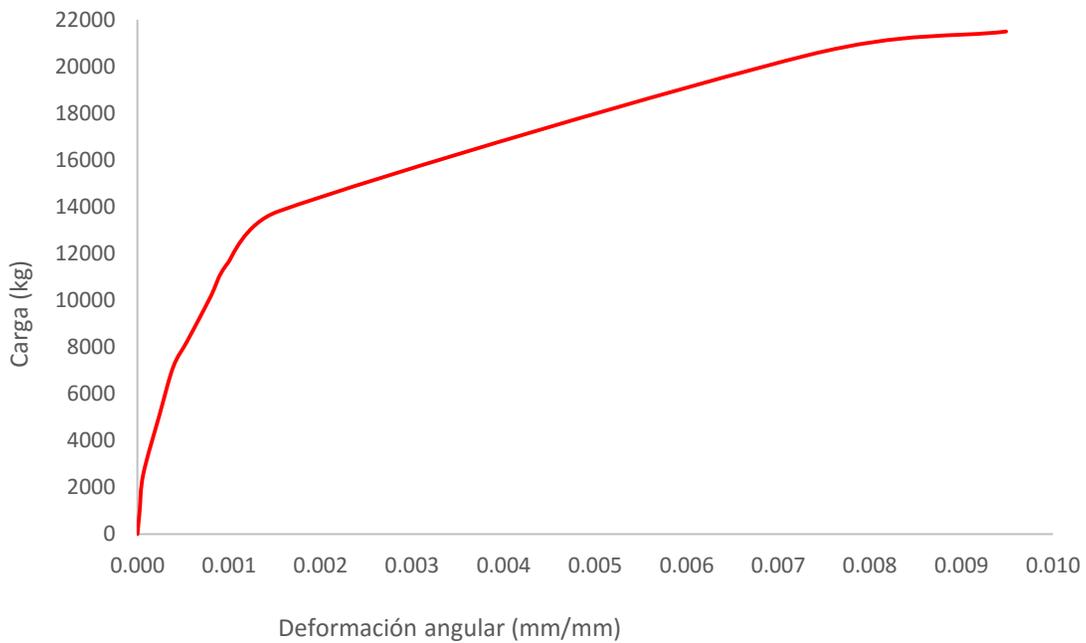


Figura 72. Envolvente de respuesta de muro testigo rehabilitado construido con piezas de block de concreto ligero.

Las curvas de histéresis de los muros testigo rehabilitados, construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero se encuentran en el apéndice C.

4.5 Ensaye de muros reforzados

Los resultados principales que se obtuvieron durante el ensaye de muros construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero, reforzados con multimalla ferretera simétrica y recubrimiento de 2 cm de mortero se presentan en la tabla 25. Se muestran los datos en dos grupos, la carga de agrietamiento (V_{Agr}) y la máxima fuerza cortante ($V_{Máx}$) registrada durante los ensayos, con la deformación angular correspondiente calculada con los registros de los micrómetros.

Tabla 25. Resultados de las pruebas en muros reforzados.

MATERIAL	AGRIETAMIENTO		CORTANTE MÁXIMO	
	V_{Agr} (kg)	γ_{Agr} (mm/mm)	$V_{Máx}$ (kg)	$\gamma_{Máx}$ (mm/mm)
Tabicón	15 900	0.00160	21 305	0.01717
Block de concreto ligero	-11 118	-0.00073	22 125	0.00720

En las figuras 73 y 74 se muestran los muros reforzados que se ensayaron durante esta etapa del proyecto.



Figura 73. Ensaye de muro de tabicón reforzado.



Figura 74. Ensayo de muro de block de concreto ligero reforzado.

Las piezas con las cuales se construyeron estos muros se obtuvieron del mismo lote que se utilizó en los estudios presentados por Jaen (2015) y Romero (2015). La elaboración de la mezcla de mortero y la construcción de los especímenes fue ejecutada por los mismos trabajadores que participaron realizando estas tareas en las investigaciones ya mencionadas.

En las figuras 75 y 76 se presentan las envolventes de respuesta de los muros reforzados.

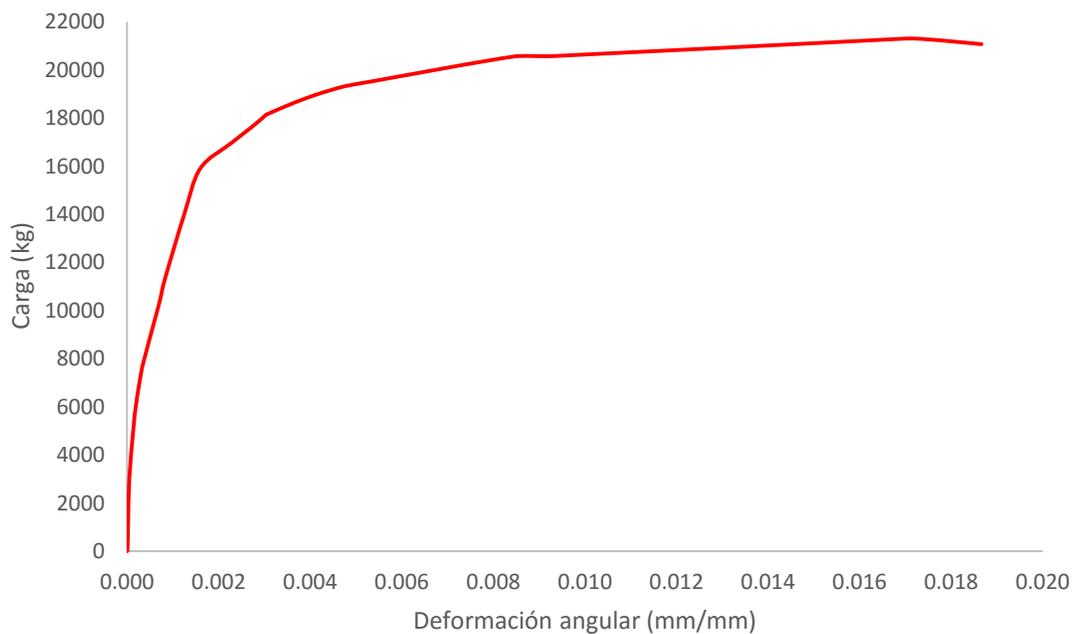


Figura 75. Envolvente de respuesta de muro reforzado construido con piezas de tabicón.

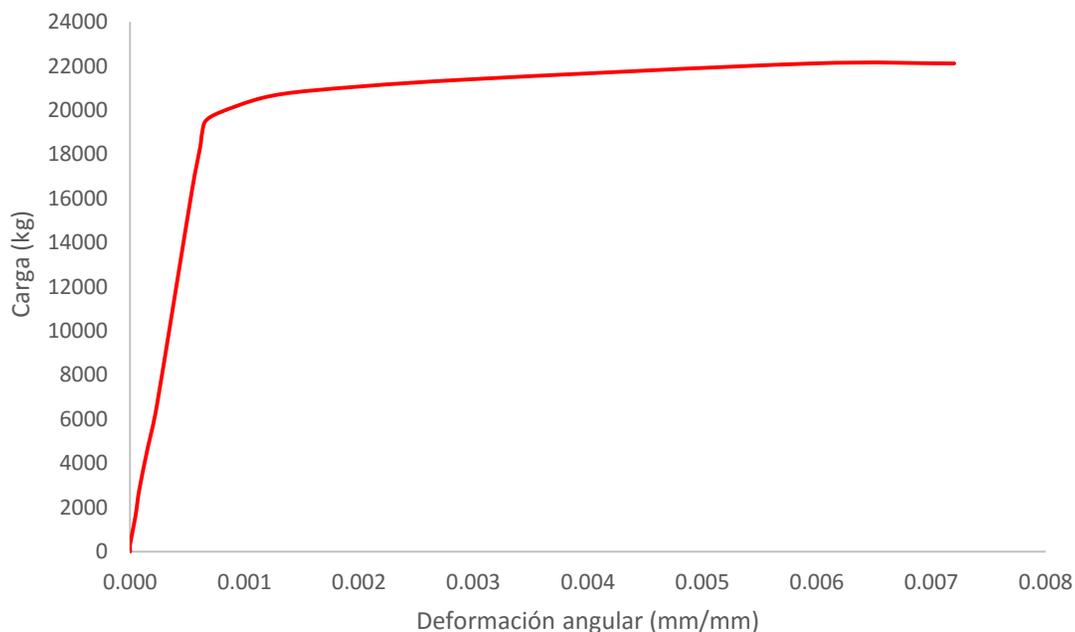


Figura 76. Envoltorio de respuesta de muro reforzado construido con piezas de block de concreto ligero.

Las curvas de histéresis de los muros reforzados construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero, obtenidas a partir de los datos de las pruebas experimentales, se encuentran en el apéndice C.

4.6 Comparación del comportamiento de los muros de tamaño real

En la tabla 26 se presentan agrupados los resultados de los ensayos realizados en los muros construidos con piezas de tabicón.

Tabla 26. Comparación de los resultados obtenidos en muros construidos con piezas de tabicón.

MURO	AGRIETAMIENTO		CORTANTE MÁXIMO	
	V _{Agr} (kg)	γ _{Agr} (mm/mm)	V _{Máx} (kg)	γ _{Máx} (mm/mm)
Testigo	9 087	0.00103	11 420	0.00325
Rehabilitado	11 800	0.00130	19 700	0.00649
Reforzado	15 900	0.00160	21 305	0.01717

Los datos están divididos en dos partes, mostrándose la carga de agrietamiento (V_{Agr}) y la máxima fuerza cortante ($V_{Máx}$) registrada durante los ensayos, con la deformación angular correspondiente.

En la tabla 26 se puede observar un incremento en la carga de agrietamiento de 30% y 75% en los muros rehabilitado y reforzado, respectivamente, con respecto al muro testigo sin refuerzo. La carga máxima registrada aumenta en un 73% con la rehabilitación y en el caso del muro reforzado se tiene una resistencia 87% mayor en relación con la del muro testigo sin refuerzo.

En la figura 77 se hace una comparación de las envolventes de respuesta de los tres muros. Puede verse un aumento en la rigidez del muro rehabilitado respecto al muro testigo hasta la carga de agrietamiento.

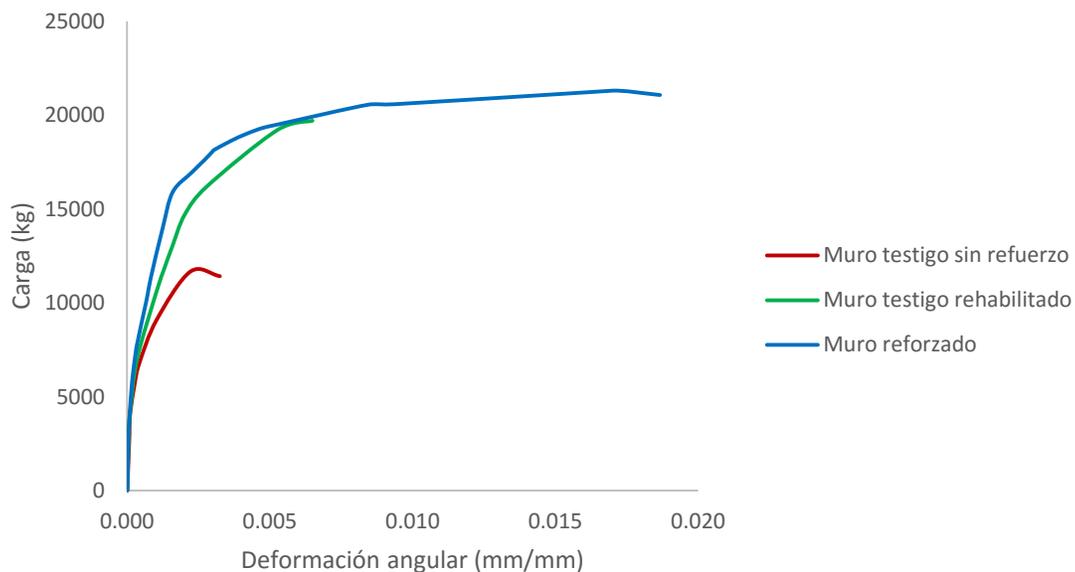


Figura 77. Envolventes de respuesta de muros construidos con piezas de tabicón.

El muro reforzado presenta una rigidez aun mayor a la de los otros muros y una capacidad de deformación más grande, la carga de agrietamiento es mayor en un 35% a la del muro rehabilitado, sin embargo, la diferencia en la carga máxima registrada de los dos muros resulta ser de un 8%.

En la tabla 27 se muestran los resultados de los ensayos en los tres muros construidos con piezas de block de concreto ligero, agrupados en dos categorías.

Se presenta la carga de agrietamiento (V_{Agr}) y la carga máxima registrada durante las pruebas ($V_{M\acute{a}x}$), con su respectiva deformación angular.

Tabla 27. Comparación de los resultados obtenidos en muros construidos con piezas de block de concreto ligero.

MURO	AGRIETAMIENTO		CORTANTE MÁXIMO	
	V_{Agr} (kg)	γ_{Agr} (mm/mm)	$V_{M\acute{a}x}$ (kg)	$\gamma_{M\acute{a}x}$ (mm/mm)
Testigo	7 300	0.00146	11 300	0.00379
Rehabilitado	13 800	0.00154	21 500	0.00949
Reforzado	-11 118	-0.00073	22 125	0.00720

Puede observarse un incremento en la carga de agrietamiento de 89% con la rehabilitación del muro testigo. En el muro reforzado la primera grieta se presentó durante un ciclo de carga negativo, resultando ser en este caso mayor en un 52% respecto a la obtenida en el primer espécimen. La carga máxima registrada aumenta en 90% en el muro testigo rehabilitado y 96% en el muro reforzado.

En la figura 78 se presentan las envolventes de respuesta de los tres especímenes, puede verse una notable diferencia en la capacidad de carga dentro del rango elástico, así como un aumento en la capacidad de deformación con la multimalla ferretera. Al igual que en los muros construidos con piezas de tabicón, se observa que a pesar de la diferencia existente entre la rigidez del muro rehabilitado y el muro reforzado, la variación en la carga máxima resulta ser de un 3%.

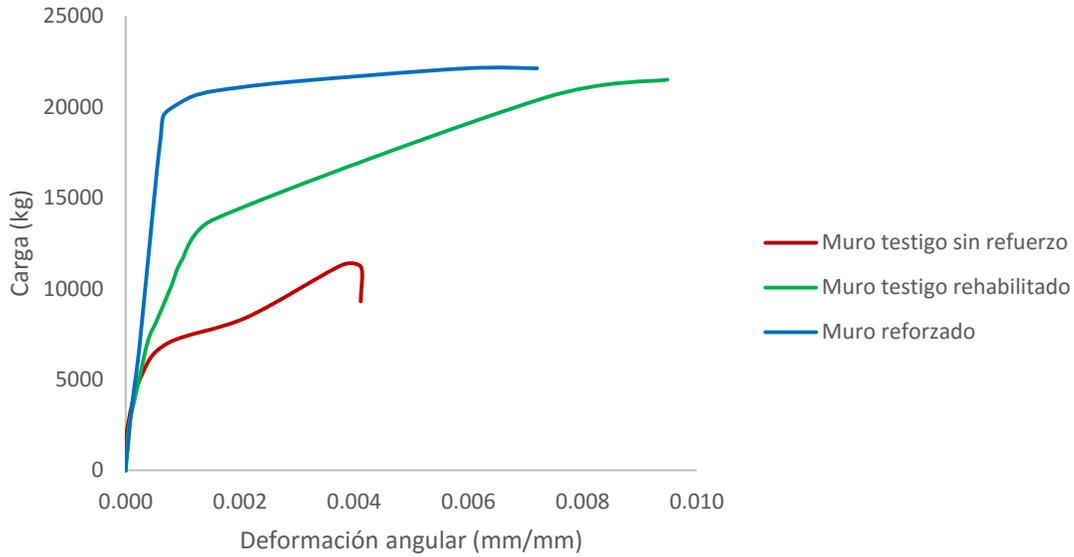


Figura 78. Envoltentes de respuesta de muros contruidos con piezas de block de concreto ligero.

En la figura 79 se muestran las envoltentes de respuesta de los seis muros que se ensayaron durante la realización de esta investigación. Es importante mencionar que los muros reforzados no alcanzaron su resistencia máxima durante los ensayos debido a que en ambos casos se presentó un desprendimiento de la base, sin embargo, en las gráficas puede observarse que el incremento de la carga durante la última fase de las pruebas no es grande.

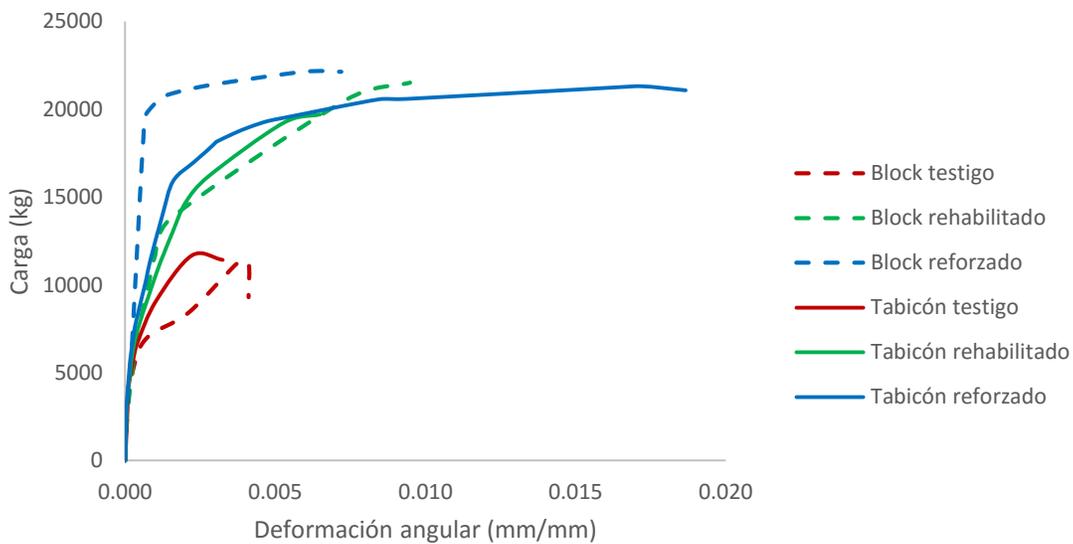
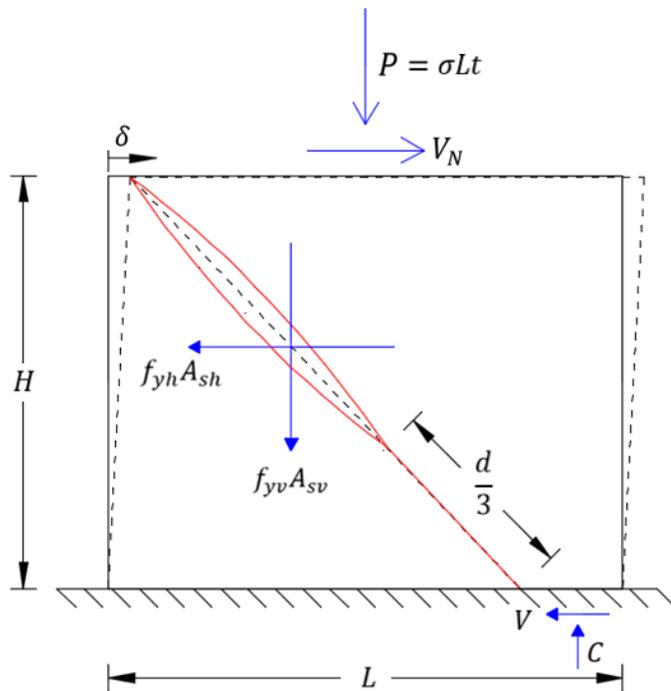


Figura 79. Envoltentes de respuesta de los muros ensayados.

4.7 Planteamiento del modelo propuesto

Con el fin de hacer la propuesta inicial de una expresión para predecir la resistencia a cortante de muros de mampostería reforzados con mallas metálicas sujetos a carga axial y lateral, se consideró un modelo simplificado con refuerzo horizontal y vertical (figura 80).

Antes de la carga en la que se produce el primer agrietamiento, el acero de refuerzo no se encuentra trabajando, después de este punto, los desplazamientos aumentan, hasta que los alambres de la malla llegan a su esfuerzo de fluencia y el muro alcanza su resistencia máxima.



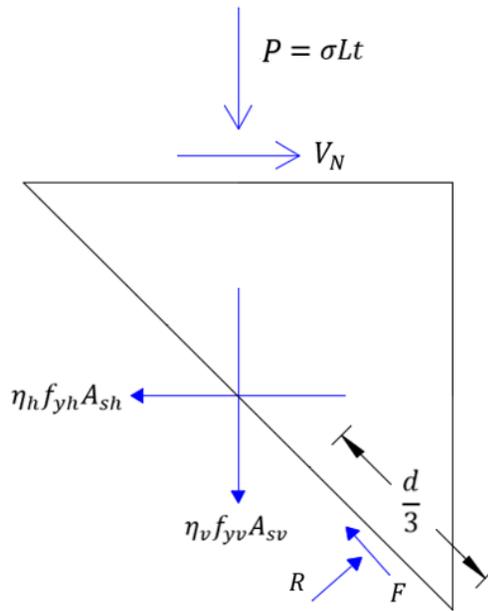
- H : Altura del muro.
- L : Longitud del muro.
- t : Espesor del muro.
- d : Longitud de diagonal a 45° .
- V_N : Fuerza cortante.
- P : Carga axial.
- δ : Desplazamiento del muro.
- σ : Esfuerzo normal.
- f_y : Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo.
- A_s : Área transversal del acero de refuerzo.
- V : Reacción horizontal de la zona a compresión en la base del muro.
- C : Reacción vertical de la zona a compresión en la base del muro.

Figura 80. Simplificación del agrietamiento en el muro sobre una diagonal a 45° .

Por simplicidad, el agrietamiento que se presenta al final del rango elástico será considerado en una sola grieta, la cual no puede abrirse en la parte superior debido al confinamiento proporcionado por la aplicación de la carga axial, pero se abre gradualmente a lo largo de una diagonal a 45° , volviéndose a cerrar a cierta distancia de la base del muro. Psilla y Tassios (2009), proponen tomar esta distancia como la tercera parte de la diagonal.

A medida que la carga lateral aumenta, el muro tiende a desprenderse de la dala de cimentación, quedando solamente una zona a compresión, que se tomará como la cuarta parte de la longitud de la base.

Para reducir la cantidad de variables, se tomó la parte superior del modelo despreciando la zona a compresión de la base del muro (figura 81), las reacciones de ésta se consideraron incluidas en las componentes verticales de las fuerzas que actúan en la longitud a compresión de la diagonal.



$$\eta_h = \frac{H}{S_h} \quad (17)$$

$$\eta_v = \frac{L}{S_v} \quad (18)$$

s: Separación del refuerzo

F: Fuerza de fricción en la longitud a compresión de la diagonal.

R: Reacción normal en la longitud a compresión de la diagonal.

Figura 81. Equilibrio de la parte superior del modelo simplificado.

En esta parte se desarrolla una fuerza de fricción F , que depende de la reacción normal R a la compresión. El esfuerzo cortante en esta zona se puede determinar con un círculo de Mohr, utilizando la resistencia a compresión de diseño de la mampostería f_m^* (f_{mc}) y estimando la resistencia a tensión (f_{mt}) como la quinceava parte de ésta (figura 82).

Para la envolvente de falla se utilizó la ecuación de la teoría de Mohr-Coulomb, $\tau = \tau_0 + \mu\sigma$, donde τ_0 es la ordenada de la intersección de la envolvente de falla con el eje vertical, σ es el esfuerzo normal promedio actuante en la longitud a compresión de la diagonal y μ es el coeficiente de fricción de la mampostería.

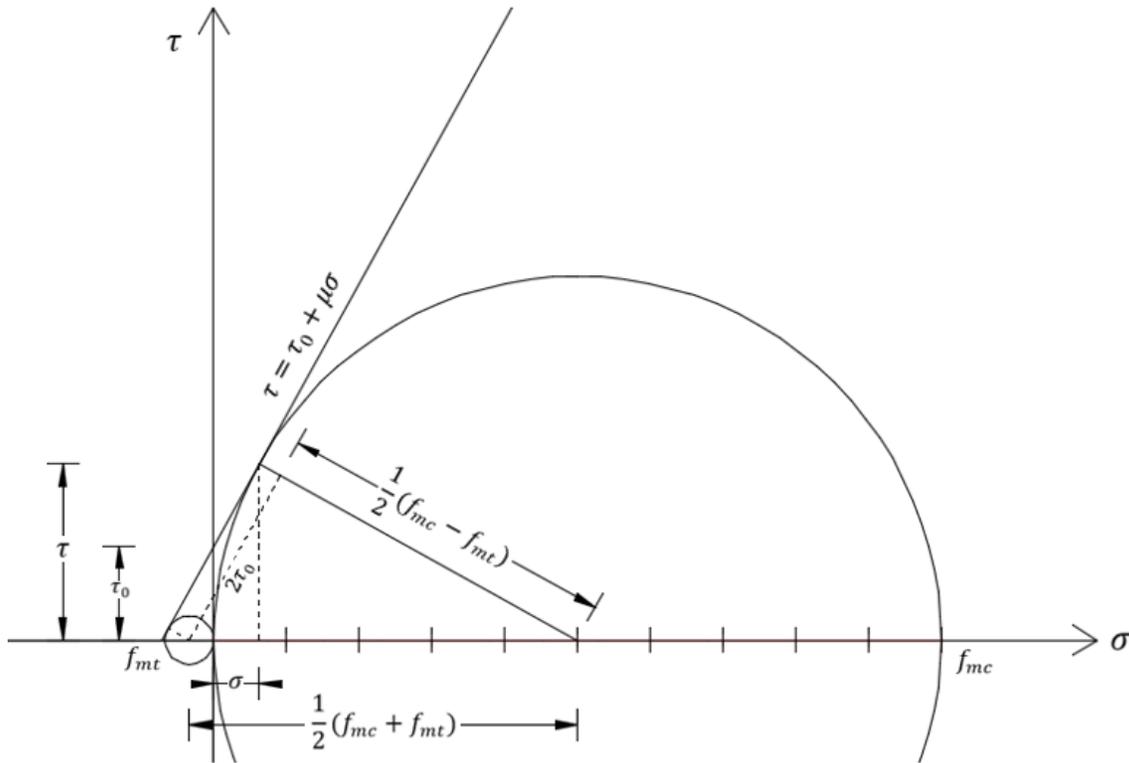


Figura 82. Círculos de Mohr de los esfuerzos normales en la longitud a compresión de la diagonal.

De la figura 82 se obtiene:

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \sqrt{f_{mc} f_{mt}} = \left(\frac{1}{2\sqrt{k}} \right) f_{mc} \quad (19)$$

Donde:

$$k = \frac{f_{mc}}{f_{mt}} \quad (20)$$

Por lo tanto:

$$\tau = 0.13 f_m^* + 1.8\sigma \quad (21)$$

Entonces, la fuerza de fricción desarrollada en la longitud a compresión de la diagonal es igual a:

$$F = (0.13 f_m^* + 1.8\sigma) t \frac{d}{3} = 0.13 f_m^* t \frac{d}{3} + 1.8R \quad (22)$$

Equilibrio de fuerzas verticales:

$$\sum F_y = 0 = -P - \eta_v f_{yv} A_{sv} + R_v + F_v \quad (23)$$

$$P + \eta_v f_{yv} A_{sv} = \frac{R}{\sqrt{2}} + \left(0.13 f_m^* t \frac{d}{3\sqrt{2}} + 1.8 \frac{R}{\sqrt{2}} \right) \quad (24)$$

$$\frac{R}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2.8} \left(P + \eta_v f_{yv} A_{sv} - 0.13 f_m^* t \frac{d}{3\sqrt{2}} \right) \quad (25)$$

Equilibrio de fuerzas horizontales:

$$\sum F_x = 0 = V_N + R_h - F_h - \eta_h f_{yh} A_{sh} \quad (26)$$

$$V_N + \frac{R}{\sqrt{2}} = \left(0.13 f_m^* t \frac{d}{3\sqrt{2}} + 1.8 \frac{R}{\sqrt{2}} \right) + \eta_h f_{yh} A_{sh} \quad (27)$$

De la ecuación 25:

$$V_N = 0.13 f_m^* t \frac{d}{3\sqrt{2}} + \eta_h f_{yh} A_{sh} + 0.3 \left(P + \eta_v f_{yv} A_{sv} - 0.13 f_m^* t \frac{d}{3\sqrt{2}} \right) \quad (28)$$

Simplificando:

$$V_N = 0.02 f_m^* t d + 0.3 P + \eta_h f_{yh} A_{sh} + 0.3 \eta_v f_{yv} A_{sv} \quad (29)$$

Si ρ es la cuantía del acero de refuerzo:

$$\rho = \frac{\eta A_s}{A_T} \quad (30)$$

$$V_N = 0.02 f_m^* t d + 0.3 P + f_{yh} \rho_h H t + 0.3 f_{yv} \rho_v L t \quad (31)$$

Flores et al. (2012) proponen considerar la contribución del mortero de recubrimiento como:

$$V_{mort} = \sqrt{f_j^* R L} \quad (32)$$

Donde R es el espesor del recubrimiento.

Considerando que después del agrietamiento del muro, el mortero de recubrimiento conserva una capacidad remanente del 80% debido a la distribución de las grietas, se propone un factor γ , que se tomará igual a la unidad para calcular la carga de agrietamiento y como 0.8 para estimar la resistencia final del muro.

$$V_N = 0.02f_m^*td + 0.3P + \gamma\sqrt{f_j^*RL + f_{yh}\rho_hHt + 0.3f_{yv}\rho_vLt} \quad (33)$$

Debe tomarse en cuenta que después de ser rehabilitado, el muro recupera solo una parte de su resistencia inicial, Flores et al. (2012) recomiendan suponer un 50%, por lo cual se considerará un factor α igual a 0.5 para muros rehabilitados y 1.0 para muros testigo y reforzados.

$$V_N = \alpha(0.02f_m^*td + 0.3P) + \gamma\sqrt{f_j^*RL + f_{yh}\rho_hHt + 0.3f_{yv}\rho_vLt} \quad (34)$$

Ya que colocación de mallas metálicas puede realizarse por una o dos caras del muro, se usará un factor φ igual a 1.0 y 2.0 según sea el caso.

$$V_N = \alpha(0.02f_m^*td + 0.3P) + \gamma\sqrt{f_j^*RL + \varphi(f_{yh}\rho_hHt + 0.3f_{yv}\rho_vLt)} \quad (35)$$

De la simplificación que se hizo del modelo original, se tiene que:

$$d = \frac{2}{\sqrt{2}}L \quad (36)$$

Por lo tanto:

$$V_N = \alpha(0.03f_m^*Lt + 0.3P) + \gamma\sqrt{f_j^*RL + \varphi(f_{yh}\rho_hHt + 0.3f_{yv}\rho_vLt)} \quad (37)$$

Para considerar la resistencia de diseño a compresión diagonal de muretes, se tomará la relación que exista entre ésta y la resistencia de diseño a compresión de pilas:

$$\omega = \frac{f_m^*}{v_m^*} \quad (38)$$

$$V_N = \alpha(0.03\omega v_m^*Lt + 0.3P) + \gamma\sqrt{f_j^*RL + \varphi(f_{yh}\rho_hHt + 0.3f_{yv}\rho_vLt)} \quad (39)$$

Utilizando un factor de corrección por esbeltez:

$$\varepsilon = \frac{H}{L} \quad (40)$$

$$V_N = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left[\alpha(0.03\omega v_m^* Lt + 0.3P) + \gamma \sqrt{f_j^*} RL + \varphi(f_{yh}\rho_h Ht + 0.3f_{yv}\rho_v Lt) \right] \quad (41)$$

Se debe considerar el deterioro del muro y del acero de refuerzo durante la aplicación de los ciclos de carga (Psilla y Tassios, 2009), en este caso se tomarán factores de reducción con valor de 0.9.

$$V_N = \frac{0.9}{\sqrt{\varepsilon}} \left[\alpha(0.03\omega v_m^* Lt + 0.3P) + \gamma \sqrt{f_j^*} RL + 0.9\varphi(f_{yh}\rho_h Ht + 0.3f_{yv}\rho_v Lt) \right] \quad (42)$$

Tassios (1998) propuso factores de eficiencia para el acero de refuerzo horizontal y vertical, calculados de la siguiente manera:

$$\lambda_h = 1 - \frac{0.6}{k_b} \cdot \frac{f_{yh}}{0.07f_j^*} \cdot \frac{d_h}{L} \quad (43)$$

$$\lambda_v = 1 - \frac{0.6}{k_b} \cdot \frac{f_{yv}}{0.07f_j^*} \cdot \frac{d_v}{H} \quad (44)$$

Donde d_h y d_v son el diámetro del acero de refuerzo horizontal y vertical, respectivamente, y k_b tiene un valor de 1.0 si la malla está colocada sobre las caras del muro y 3.0 si lo envuelve. En caso de que resulten valores negativos de los factores λ , estos se tomarán igual a cero.

Finalmente, la expresión propuesta es:

$$V_N = \frac{0.9}{\sqrt{\varepsilon}} \left[\alpha(0.03\omega v_m^* Lt + 0.3P) + \gamma \sqrt{f_j^*} RL + 0.9\varphi(\lambda_h f_{yh}\rho_h Ht + 0.3\lambda_v f_{yv}\rho_v Lt) \right] \quad (45)$$

Para diseño se utilizará el factor de resistencia $F_R = 0.7$ señalado por las NTC-RCDF-2004 para muros sujetos a fuerza cortante.

$$V_D = \frac{0.9F_R}{\sqrt{\varepsilon}} \left[\alpha(0.03\omega v_m^* Lt + 0.3P) + \gamma \sqrt{f_j^*} RL + 0.9\varphi(\lambda_h f_{yh}\rho_h Ht + 0.3\lambda_v f_{yv}\rho_v Lt) \right] \quad (46)$$

4.8 Validación del modelo propuesto

Con la ecuación 46 se hicieron predicciones teóricas que fueron comparadas con los resultados de las pruebas experimentales realizadas en los muros de tamaño real y con una base de datos recaba de otras investigaciones.

4.8.1 Comparación con resultados de pruebas experimentales

En la tabla 28 se presenta la relación de los resultados obtenidos en los muros testigo sin refuerzo y los valores teóricos de agrietamiento. Además, se muestra la resistencia de diseño calculada con las expresiones de las NTC-RCDF-2004, haciendo una comparación de la aproximación que se tiene con respecto a los valores reales. El factor de resistencia F_R se tomó igual a 1.0.

Tabla 28. Comparación de las predicciones teóricas con resultados de pruebas experimentales en muros testigo sin refuerzo.

MURO	EXPERIMENTAL	MODELO	NTC-RCDF-2004	$\frac{V_{Agr}}{V_N}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$
	V_{Agr} (kg)	V_N (kg)	V_{mR} (kg)		
Tabicón testigo	9 807	8 142.26	8 337.50	1.20	1.18
Block testigo	7 300	7 103.36	10 275	1.03	0.71

En los datos mostrados en la tabla 28 se observa una buena correlación entre los valores reales y los teóricos calculados con las ecuaciones 15 y 46. En ambos casos solo se considera la resistencia de la mampostería ya que, al ser muros testigo, no existe la contribución de algún tipo de refuerzo.

La comparación entre los valores de agrietamiento y de resistencia máxima, reales y teóricos para los muros testigo rehabilitados se presentan en la tablas 29 y 30. Se usó un factor de 0.5 para reducir la resistencia de la mampostería en las ecuaciones de las NTC-RCDF-2004.

Tabla 29. Comparación de las predicciones teóricas con resultados de pruebas experimentales en muros testigo rehabilitados.

MURO	EXPERIMENTAL		MODELO		NTC-RCDF-2004	
	V_{Agr} (kg)	$V_{Máx}$ (kg)	$V_{N(Agr)}$ (kg)	$V_{N(Máx)}$ (kg)	$0.5V_{mR}$ (kg)	$0.5V_{mR} + V_{sR}$ (kg)
Tabicón rehabilitado	11 800	19 700	11 918.70	20 657.06	4 168.75	11 348.17
Block rehabilitado	13 800	21 500	11 399.25	20 137.62	5 137.50	12 316.92

Tabla 30. Relación entre predicciones teóricas y valores reales en muros testigo rehabilitados.

MURO	MODELO		NTC-RCDF-2004	
	$\frac{V_{Agr}}{V_{N(Agr)}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{N(Máx)}}$	$\frac{V_{Agr}}{0.5V_{mR}}$	$\frac{V_{Máx}}{0.5V_{mR} + V_{sR}}$
Tabicón rehabilitado	0.99	0.95	2.83	1.74
Block rehabilitado	1.21	1.07	2.69	1.75

En este caso se puede ver que son mejores las aproximaciones calculadas con el modelo propuesto, debido a que se toma en cuenta la contribución del acero de refuerzo vertical y del mortero de recubrimiento. Para los dos muros se redujo la resistencia de la mampostería a la mitad para considerar la capacidad de carga que recuperan los muros después de la rehabilitación.

En las tablas 31 y 32 se muestran los datos correspondientes al ensaye de muros reforzados, considerando íntegra la resistencia de la mampostería tanto en la ecuación 46 como en las expresiones de las NTC-RCDF-2004. La contribución del refuerzo se toma en cuenta para la resistencia máxima, después del agrietamiento, cuando los alambres de la malla empiezan a trabajar.

Tabla 31. Comparación de las predicciones teóricas con resultados de pruebas experimentales en muros reforzados.

MURO	EXPERIMENTAL		MODELO		NTC-RCDF-2004	
	V_{Agr} (kg)	$V_{Máx}$ (kg)	$V_{N(Agr)}$ (kg)	$V_{N(Máx)}$ (kg)	V_{mR} (kg)	$V_{mR} + V_{SR}$ (kg)
Tabicón reforzado	15 900	21 305	15 989.82	24 728.19	8 337.50	15 516.92
Block reforzado	11 118	22 125	14 950.93	23 689.30	10 275	17 454.42

Tabla 32. Relación entre predicciones teóricas y valores reales en muros reforzados.

MURO	MODELO		NTC-RCDF-2004	
	$\frac{V_{Agr}}{V_{N(Agr)}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{N(Máx)}}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{mR} + V_{SR}}$
Tabicón reforzado	0.99	0.93	1.91	1.43
Block reforzado	0.74	0.93	1.08	1.27

En la tabla 32 se observa una mejor aproximación con las expresiones de las NTC-RCDF-2004 para el muro reforzado construido con piezas de block de concreto ligero en el rango elástico, sin embargo, después de que se presenta el agrietamiento el valor obtenido con la ecuación 46 es más cercano al real.

Los datos presentados en las tablas 28 a 32 muestran, en general, que los resultados calculados con el modelo propuesto son más cercanos a los de las pruebas experimentales que los obtenidos con las ecuaciones de las NTC-RCDF-2004, sin embargo, es importante mencionar que ésta es solo una propuesta inicial, ya que es necesario hacer estudios sobre la influencia de algunas variables que pueden ser determinantes en los resultados.

En las figuras 83 y 84 se muestran las envolventes de respuesta de los muros construidos con piezas de tabicón y block de concreto ligero, respectivamente, haciendo una comparación de la carga de agrietamiento (en muros testigo) y la

resistencia máxima (muros rehabilitados y reforzados), calculadas usando la expresión propuesta (ecuación 46).

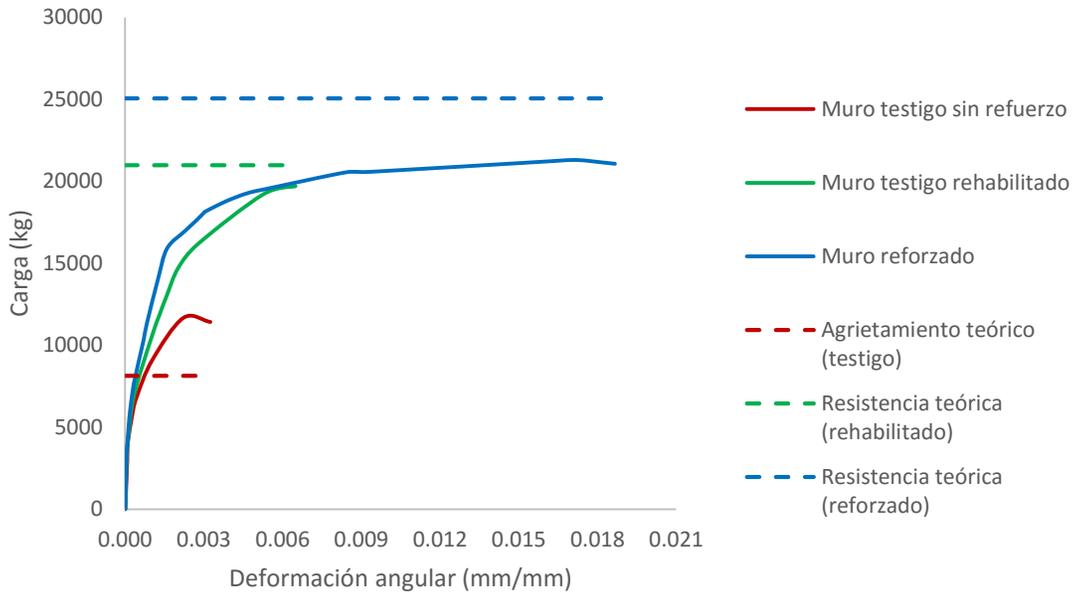


Figura 83. Comparación de las envolventes de respuesta con los valores teóricos (tabicón).

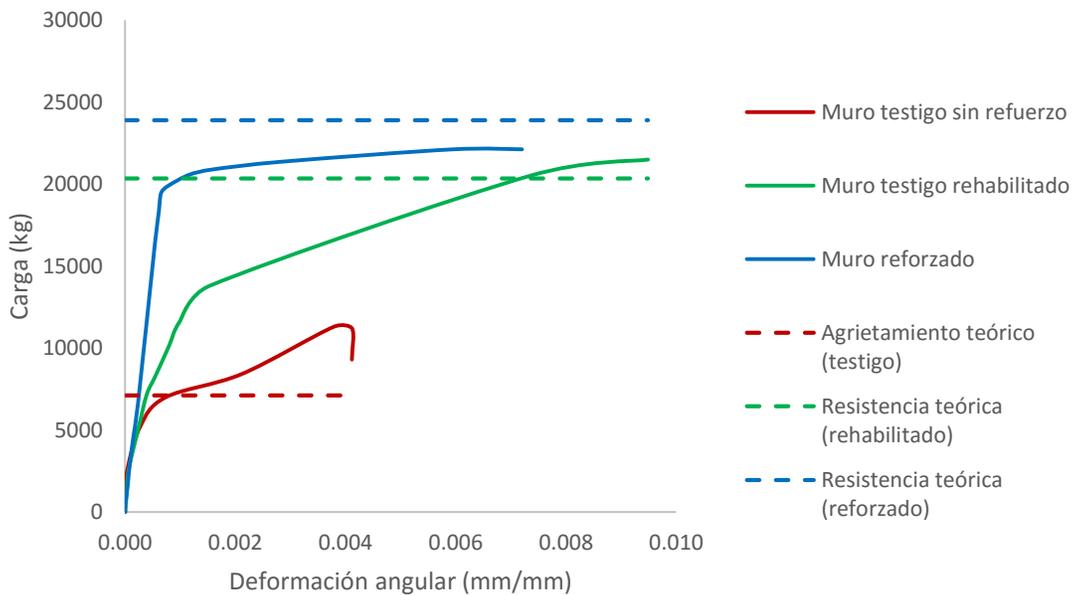


Figura 84. Comparación de las envolventes de respuesta con los valores teóricos (block de concreto ligero).

4.8.2 Comparación con datos recabados de otras investigaciones

Como parte de la validación del modelo, se obtuvo una base de datos de los estudios mencionados en la sección 3.7.2.

En la tabla 33 se muestra la comparación entre los resultados obtenidos por Alcocer et al. (1996) en un muro testigo sin refuerzo y los correspondientes calculados con las ecuaciones 15 y 46. La relación de los datos de muros reforzados presentados en el mismo estudio con valores teóricos se presenta en las tablas 34 y 35. El factor de resistencia F_R se tomó igual a 1.0.

Tabla 33. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Alcocer et al. (1996) en muro testigo sin refuerzo

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL	MODELO	NTC-RCDF-2004	$\frac{V_{Agr}}{V_N}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$
	V_{Agr} (kg)	V_N (kg)	V_{mR} (kg)		
M0	10 625.00	8 691.00	15 625.00	1.22	0.68

Tabla 34. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Alcocer et al. (1996) en muros reforzados.

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL		MODELO		NTC-RCDF-2004	
	V_{Agr} (kg)	$V_{Máx}$ (kg)	$V_{N(Agr)}$ (kg)	$V_{N(Máx)}$ (kg)	V_{mR} (kg)	$V_{mR} + V_{sR}$ (kg)
M1	20 312.50	30 000	19 713	28 886.28	15 625	24 865.13
M2	21 250	33 687.50	18 919	33 606.60	15 625	21 859.60

Tabla 35. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Alcocer et al. (1996) en muros reforzados.

ESPÉCIMEN	MODELO		NTC-RCDF-2004	
	$\frac{V_{Agr}}{V_{N(Agr)}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{N(Máx)}}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{mR} + V_{sR}}$
M1	1.03	1.04	1.30	1.21
M2	1.12	1.002	1.36	1.54

En los datos de la tabla 33 se observa una mejor aproximación con el modelo propuesto a los valores reales, teniendo una dispersión de 22% contra 32% usando la expresión de las NTC-RCDF-2004.

Para los muros reforzados también se tienen predicciones teóricas más cercanas a los datos experimentales usando la ecuación 46, con variaciones máximas de 12%.

Los resultados de ensayos realizados por Flores et al. (2004) en muros construidos con piezas macizas de arcilla se muestran en las tablas 36 a 38. Los especímenes fueron previamente dañados ante cargas laterales cíclicas y posteriormente rehabilitados con malla de alambre soldado y recubrimiento de mortero.

Tabla 36. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2004) en muros testigo sin refuerzo.

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL	MODELO	NTC-RCDF-2004	$\frac{V_{Agr}}{V_N}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$
	V_{Agr} (kg)	V_N (kg)	V_{mR} (kg)		
MV-1	5 400	4 467.92	5 556.60	1.21	0.97
MV-2	5 270	4 467.92	5 556.60	1.18	0.95

Tabla 37. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2004) en muros testigo rehabilitados.

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL		MODELO		NTC-RCDF-2004	
	V_{Agr} (kg)	$V_{Máx}$ (kg)	$V_{N(Agr)}$ (kg)	$V_{N(Máx)}$ (kg)	$0.5V_{mR}$ (kg)	$0.5V_{mR} + V_{SR}$ (kg)
MV-1R	14 000	30 000	15 482.53	24 497.26	2 778.30	14 420.86
MV-2R	11 020	27 020	15 482.53	24 497.26	2 778.30	14 420.86

Tabla 38. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Flores et al. (2004) en muros testigo rehabilitados.

ESPÉCIMEN	MODELO		NTC-RCDF-2004	
	$\frac{V_{Agr}}{V_{N(Agr)}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{N(Máx)}}$	$\frac{V_{Agr}}{0.5V_{mR}}$	$\frac{V_{Máx}}{0.5V_{mR} + V_{sR}}$
MV-1R	0.90	1.22	5.04	2.08
MV-2R	0.71	1.10	3.97	1.87

Los valores de la tabla 36 muestran una mayor aproximación con la ecuación de las NTC-RCDF-2004, sin embargo, después de la rehabilitación hay una diferencia muy grande con los resultados de pruebas experimentales. Las predicciones calculadas con el modelo propuesto se aproximan más, pero tienen variaciones hasta del 29%, que se pueden justificar por la presencia de aberturas en los muros y un mayor confinamiento debido a la colocación de la malla en contacto con la mampostería.

Velázquez et al. (2010) ensayaron muros de mampostería confinada construidos con piezas de block. En la tabla 39 se presenta la relación entre los datos reportados en este estudio con los obtenidos usando las ecuaciones 15 y 46.

Tabla 39. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Velázquez et al. (2010) en muros testigo sin refuerzo.

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL	MODELO	NTC-RCDF-2004	$\frac{V_{Agr}}{V_N}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$
	V_{Agr} (kg)	V_N (kg)	V_{mR} (kg)		
MSR-1	7 840	7 185.01	6 732	1.09	1.16
MCR-2	7 364	7 185.01	6 732	1.02	1.09

En este caso no se rehabilitaron los muros y la aproximación de los valores calculados con el modelo propuesto a los reales es mayor a la que se obtiene con la ecuación de las NTC-RCDF-2004 en los dos especímenes.

La comparación de los resultados obtenidos en el muro previamente dañado y rehabilitado por Flores et al. (2012) con los valores teóricos obtenidos con la expresión propuesta y las utilizadas por las NTC-RCDF-2004 se muestra en las tablas 40 a 42.

Tabla 40. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2012) en muro testigo sin refuerzo.

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL	MODELO	NTC-RCDF-2004	$\frac{V_{Agr}}{V_N}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$
	V_{Agr} (kg)	V_N (kg)	V_{mR} (kg)		
ME5	25 650	23 794.44	19 487.04	1.08	1.32

Tabla 41. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Flores et al. (2012) en un muro testigo rehabilitado.

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL		MODELO		NTC-RCDF-2004	
	V_{Agr} (kg)	$V_{Máx}$ (kg)	$V_{N(Agr)}$ (kg)	$V_{N(Máx)}$ (kg)	$0.5V_{mR}$ (kg)	$0.5V_{mR} + V_{SR}$ (kg)
ME5-R	19 950	38 840	26 119.30	37 420.87	9 743.52	25 604.33

Tabla 42. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Flores et al. (2012) en muro testigo rehabilitado.

ESPÉCIMEN	MODELO		NTC-RCDF-2004	
	$\frac{V_{Agr}}{V_{N(Agr)}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{N(Máx)}}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$	$\frac{V_{Máx}}{0.5V_{mR} + V_{SR}}$
ME5-R	0.76	1.04	2.05	1.52

En las tablas 40 y 41 se puede ver una gran similitud entre los valores reales y teóricos de la carga de agrietamiento antes de la rehabilitación y en la resistencia máxima después de ésta, en este caso también se obtuvieron mejores aproximaciones respecto a las expresiones de las NTC-RCDF-2004. La variación

de los resultados en la carga de agrietamiento del muro rehabilitado se puede explicar considerando que al estar construido con piezas huecas multiperforadas no se recupera el mismo porcentaje de resistencia que en piezas macizas.

Pineda y Alcocer (2004) realizaron ensayos en muros de mampostería confinada construidos con piezas de tabique macizo de arcilla, reforzados con malla de alambre soldado utilizando diferentes cuantías y tipos de anclaje. La comparación de los resultados de los ensayos y los valores teóricos obtenidos con las ecuaciones 15, 16 y 46 se presenta en las tablas 43 y 44.

Tabla 43. Comparación de predicciones teóricas con los resultados obtenidos por Pineda y Alcocer (2004) en muros reforzados.

ESPÉCIMEN	EXPERIMENTAL		MODELO		NTC-RCDF-2004	
	V_{Agr} (kg)	$V_{Máx}$ (kg)	$V_{N(Agr)}$ (kg)	$V_{N(Máx)}$ (kg)	V_{mR} (kg)	$V_{mR} + V_{sR}$ (kg)
M-072	23 700	36 700	17 966.25	35 621.76	11 712.50	18 462.50
M-147	22 900	19 800	17 966.25	44 373.85	11 712.50	21 359.38
M-211	28 800	50 500	17 966.25	49 745.65	11 712.50	18 306.25

Tabla 44. Relación entre predicciones teóricas y valores reales obtenidos por Pineda y Alcocer (2004) en muros reforzados.

ESPÉCIMEN	MODELO		NTC-RCDF-2004	
	$\frac{V_{Agr}}{V_{N(Agr)}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{N(Máx)}}$	$\frac{V_{Agr}}{V_{mR}}$	$\frac{V_{Máx}}{V_{mR} + V_{sR}}$
M-072	1.32	1.03	2.02	1.99
M-147	1.27	0.45	1.96	0.93
M-211	1.60	1.06	2.46	2.76

En este estudio se observó que el incremento de la resistencia a carga lateral no fue proporcional a la cuantía utilizada, para el modelo M-147 (con cuantía de 0.147%) se esperaba una resistencia intermedia entre la alcanzada en los muros

M-072 y M-211 (con cuantías de 0.072% y 0.211%, respectivamente), los autores concluyen que una pérdida temprana de la contribución del mortero afectó estos resultados. En el caso del cortante de agrietamiento, éste resultó ser mayor según la cuantía empleada.

Aunque el cortante de agrietamiento teóricamente debería ser igual para los tres muros, sin importar la cantidad de refuerzo proporcionado, las diferencias obtenidas pueden ser causa del mayor o menor confinamiento proporcionado a los tabiques y al muro en general, por el tipo de anclaje utilizado y debido a que la malla se colocó completamente adosada a la mampostería.

En cuanto a la comparación con las predicciones teóricas calculadas con la ecuación 46, se observa una buena aproximación en la resistencia máxima de los muros, con excepción del caso particular del espécimen M-147, por la pérdida prematura de la contribución del mortero de recubrimiento. En el caso del cortante de agrietamiento, los valores teóricos resultaron estar por debajo de los reales, lo cual se puede explicar por la variación del tipo de anclaje utilizado y el confinamiento adicional proporcionado por la forma en que se colocó la malla de alambre.

Para los tres muros se tuvo una mejor aproximación con el modelo propuesto respecto a los valores obtenidos con los lineamientos de las NTC-RCDF-2004.

Con la comparación realizada de las predicciones teóricas obtenidas usando la ecuación 46 con la base de datos recabada de los estudios mencionados anteriormente, se puede observar que hay variables con gran influencia en los resultados finales. La expresión propuesta en esta investigación se puede mejorar haciendo ensayos experimentales para determinar factores con los que se consideren parámetros como la presencia de aberturas, la forma de colocar las mallas metálicas, el tipo de anclaje y las características de las piezas.

5. CONCLUSIONES

A partir de la base de datos de las propiedades de los materiales utilizados para la construcción de pilas, muretes y muros de tamaño real, puede observarse que la resistencia a compresión obtenida en los dos tipos de pieza, no cumple con la mínima requerida por la norma NMX-C-404-ONNCCE-2005, sin embargo, su comportamiento en conjunto es satisfactorio, ya que en ambos casos se supera la resistencia de diseño de pilas y muretes especificada en la norma mencionada.

De las otras características que se determinaron, solo la absorción máxima a 24 horas del tabicón y el módulo de ruptura de los dos tipos de pieza, cumplen con los límites establecidos. En el caso del mortero tampoco se obtuvo la resistencia de diseño esperada, esta cuestión ha sido previamente estudiada, observando que es muy difícil alcanzar este valor, acorde a las proporciones de las NTC-RCDF-2004, aun en las condiciones más favorables.

El módulo de elasticidad obtenido del ensaye de pilas está por debajo del señalado en las NTC-RCDF-2004, por el contrario, el módulo de cortante calculado con los resultados de las pruebas a compresión diagonal de muretes supera el valor establecido por estas normas, sin embargo, como se menciona en la sección 4.2, en este caso hubo datos con una variación muy grande respecto a la media que se tomaron en cuenta, lo cual tiene como consecuencia la alteración del resultado final.

Se debe considerar que los valores marcados por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-RCDF-2004) se basan en las características de los materiales del Distrito Federal, que no son las mismas en todo el país, variando de región a otra. Por este motivo, es necesaria la creación de normas técnicas que contemplen parámetros más apegados a las propiedades de los materiales de la región donde se realicen los estudios.

En el ensaye de muros de tamaño real se obtuvo el comportamiento esperado, la colocación de mallas metálicas, ya sea como técnica de rehabilitación o de refuerzo, incrementó la resistencia hasta en un 100%. Se observó que aunque

la carga de agrietamiento fue mayor en los muros reforzados que en los rehabilitados, la variación entre las máximas fuerzas cortantes registradas durante los ensayos no fue grande. Esto se debe a que después de la rehabilitación, los muros solo recuperan una parte de su capacidad de carga (Flores et al. (2012) proponen considerar el 50%), pero la contribución de las mallas metálicas y la remanente del mortero hacen que aumente su resistencia después del agrietamiento.

Se hizo el planteamiento de una expresión para calcular la resistencia a cortante de muros de mampostería reforzados con mallas metálicas, considerando la resistencia del muro, la carga axial aplicada, la contribución del mortero de recubrimiento y del acero de refuerzo horizontal y vertical. Para la validación del modelo se hizo una comparación de los resultados teóricos con los obtenidos de las pruebas experimentales llevadas a cabo en los muros ensayados, encontrando una buena correlación entre estos valores.

Las predicciones teóricas obtenidas con la ecuación propuesta en esta investigación se pueden mejorar a partir de la realización de pruebas experimentales que tomen en cuenta factores como: las propiedades de las piezas, la influencia de la cuantía del acero de refuerzo, el uso de aberturas con y sin refuerzo, la adherencia de los materiales, la forma en que se colocan las mallas metálicas, el tipo de anclaje y la relación entre el volumen del mortero de pega y las piezas de mampostería.

REFERENCIAS

- 1) Alcocer, S. M. et al. (1996), "Retrofitting of confined masonry walls with welded wire mesh", Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, paper No. 1471.
- 2) Alcocer, S. M. (2003), "Capítulo 11: Rehabilitación de estructuras de mampostería", Edificaciones de mampostería, Fundación ICA, México.
- 3) Alonso, N. y Mendoza, G. (2012), "Comportamiento de la mampostería sometida a esfuerzos cortantes, reforzada con mallas metálicas y recubrimientos de mortero", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UAQ.
- 4) Bass, R. A. et al. (1989), "Shear transfer across new and existing concrete interfaces", ACI Structural Journal 86, 383-393.
- 5) De la Torre, O. (1995), "Evaluación y reparación estructural de edificios", Curso sobre seguridad sísmica de las construcciones para directores responsables de obra", Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- 6) Flores, L. (2003), "Evaluación experimental de marcos con muro diafragma de bloque, reforzados con recubrimiento de concreto", Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 7) Flores, L. et al. (2004), "Rehabilitación con malla y mortero de muros de mampostería con aberturas", Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, México.
- 8) Flores, L. et al. (2012), "Rehabilitación de muros de mampostería de piezas multiperforadas reforzados con mortero con fibras o con mortero y malla de alambre", Memorias del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, México.
- 9) Gallegos, H. (1989), "Albañilería estructural", Pontificia Universidad Católica de Perú, Lima, Perú.
- 10) Jaen, F. (2015), "Comportamiento ante cargas laterales de muros de piezas de concreto ligero: correlación entre resultados de especímenes a escala y muros de tamaño real", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UAQ.
- 11) Juárez, A. (2007), "Mecanismos de resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y reforzada", Tesis de maestría, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, UAM.
- 12) Lizárraga, J. F. y Pérez, J. J. (2012), "Modelación no lineal de muros de mampostería empleando elementos de contacto", Memorias del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, México.

- 13) Lopes, F. (2011), "Rehabilitación de muros de mampostería con la aplicación de revestimientos resistentes de mortero armado", Tesis de doctorado, Universidad de San Paulo, Brasil.
- 14) Meli, R. y Salgado G. (1969), "Comportamiento de muros de mampostería sujetos a carga lateral", Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- 15) Meli, R. y Reyes G. A. (1971), "Propiedades mecánicas de la mampostería", Ingeniería, Vol. 41, No. 3, México.
- 16) Meli, R. (1979), "Comportamiento sísmico de muros de mampostería", Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- 17) Norma ASTM-C67-91, "Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile".
- 18) Norma mexicana NMX-C-021-ONNCCE-2004, "Industria de la construcción – cemento para albañilería (mortero) – especificaciones y métodos de prueba".
- 19) Norma mexicana NMX-C-036-ONNCCE-2004, "Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines – resistencia a la compresión – método de prueba".
- 20) Norma mexicana NMX-C-037-ONNCCE-2005, "Industria de la construcción – bloques, ladrillos o tabiques y tabicones – determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua".
- 21) Norma mexicana NMX-C-038-ONNCCE-2004, "Industria de la construcción – determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción".
- 22) Norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2001, "Industria de la construcción – cemento – determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos".
- 23) Norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-1997, "Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – especificaciones y métodos de prueba".
- 24) Norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2005, "Industria de la construcción – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – especificaciones y métodos de prueba".
- 25) Norma mexicana NMX-407-ONNCCE-2001, "Industria de la construcción – varilla corrugada de acero proveniente de lingote y palanquilla para refuerzo de concreto – especificaciones y métodos de prueba".

- 26) Norma mexicana NMX-C-464-ONNCCE-2010, "Industria de la construcción – mampostería – Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o concreto".
- 27) NTC-RCDF-2004 (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- 28) Pérez, J. J. (2012), "Guía de análisis de estructuras de mampostería", Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A. C.
- 29) Pineda, J. A. y Alcocer, S. M. (2004), "Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla de alambre soldado", Área de Ingeniería Estructural y Geotecnia, CENAPRED, México.
- 30) Psilla, N. y Tassios, P. T. (2009), "Design models of reinforced masonry walls under monotonic and cyclic loading", Engineering Structures 31, 935-945.
- 31) Rodríguez, M. y Castrillón, E. (1995), "Manual de evaluación postsísmica de la seguridad estructural de edificaciones", Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- 32) Romero, A. (2015), "Resistencia a cortante en muros de bloques de concreto ligero y tabicón rehabilitados con multimalla ferretera", Tesina de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UAQ.
- 33) Tassios, P. T. (1998), "The seismic design – state of practice", 11th European Conference on Earthquake Engineering.
- 34) Tena, A. y Miranda, E. (2003), "Capítulo 4: Comportamiento mecánico de la mampostería", Edificaciones de mampostería, Fundación ICA, México.
- 35) Vasconcelos D. y Sánchez T. (2003), "Capítulo 3: Materiales y sistemas constructivos para vivienda de mampostería", Edificaciones de mampostería, Fundación ICA, México.
- 36) Velázquez, J. I. et al. (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, Guanajuato, México.
- 37) Xu, C. et al. (2011), "Modeling of influence of heterogeneity on mechanical performance of unreinforced masonry shear walls", Construction and Building Materials 26, 90-95.

APÉNDICE A – PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

A. 1 Dimensiones de las piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	ANCHO (cm)			
5	13.80	13.80	13.90	13.83
9	13.90	13.90	14.00	13.93
13	13.90	13.90	13.90	13.90
17	14.00	14.10	14.20	14.10

MEDIA (cm) 13.94

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cm) 0.11

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.01

ESPÉCIMEN	ALTURA (cm)			
5	9.90	9.90	9.90	9.90
9	9.90	9.90	9.90	9.90
13	9.90	9.90	9.90	9.90
17	10.00	10.00	10.00	10.00

MEDIA (cm) 9.93

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cm) 0.05

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.01

ESPÉCIMEN	LONGITUD (cm)			
5	27.80	27.80	27.80	27.80
9	27.90	27.80	27.70	27.80
13	27.80	27.80	27.90	27.83
17	27.90	27.90	27.80	27.87

MEDIA (cm) 27.83

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cm) 0.03

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.001

A. 2 Dimensiones de las piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	ANCHO (cm)			
	1	15.10	15.10	15.00
7	15.00	15.10	15.00	15.03
12	15.30	15.20	15.00	15.17
17	15.00	15.00	15.00	15.00

MEDIA (cm) 15.07

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cm) 0.07

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.005

ESPÉCIMEN	ALTURA (cm)			
	1	19.90	19.90	19.80
7	20.00	20.00	19.90	19.97
12	19.70	19.70	19.80	19.73
17	19.90	19.90	19.80	19.87

MEDIA (cm) 19.86

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cm) 0.10

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.01

ESPÉCIMEN	LONGITUD (cm)			
	1	39.90	39.90	39.90
7	39.90	39.90	39.80	39.87
12	40.00	40.10	40.10	40.07
17	39.90	39.80	39.80	39.83

MEDIA (cm) 39.92

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (cm) 0.11

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.003

A. 3 Resistencia a compresión de las piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	CARGA MÁXIMA (kg)	f_p (kg/cm ²)
T1	16 717.64	43.09
T2	14 936.80	38.50
T3	15 243.63	39.29
T4	13 178.39	33.97
T5	15 824.67	40.79
T6	17 825.69	45.95

MEDIA (kg/cm²) 40.27

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm²) 4.11

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.10

A. 4 Resistencia a compresión de las piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	CARGA MÁXIMA (kg)	f_p (kg/cm ²)
2	52 000	86.44
3	54 250	90.18
4	42 000	69.81
6	47 500	78.96
8	54 250	90.18
9	46 250	76.88
11	41 500	68.98
13	40 000	66.49
14	45 000	74.80
16	45 500	75.63
18	40 250	66.91

MEDIA (kg/cm²) 76.84

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm²) 8.80

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.11

A. 5 Absorción inicial de las piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	W_s (g)	$W_{10 \text{ min}}$ (g)	$A_{10 \text{ min}}$ (g/min)
T1	5 230	5 470	30.12
T2	5 230	5 490	32.63
T3	5 100	5 360	32.63
T4	5 100	5 410	38.90
T5	4 950	5 330	47.69
T6	5 060	5 430	46.43

MEDIA (g/min) 38.07

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g/min) 7.56

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.20

A. 6 Absorción inicial de las piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	W_s (g)	$W_{10 \text{ min}}$ (g)	$A_{10 \text{ min}}$ (g/min)
1	13 720	13 950	12.10
7	13 120	13 230	5.80
12	12 650	13 025	19.51
17	14 020	14 400	20.11

MEDIA (g/min) 14.38

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (g/min) 6.78

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.47

A. 7 Absorción máxima a 24 horas de las piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	W_s (g)	W_{24 horas} (g)	Absorción (%)
T1	5 230	5 900	12.81
T2	5 230	5 890	12.62
T3	5 100	5 860	14.90
T4	5 100	5 860	14.90
T5	4 950	5 750	16.16
T6	5 060	5 860	15.81

MEDIA (%) 14.53

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%) 1.50

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.10

A. 8 Absorción máxima a 24 horas de las piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	W_s (g)	W_{24 horas} (g)	Absorción (%)
1	13 720	17 050	24.27
7	13 120	16 270	24.01
12	12 650	16 410	29.72
17	14 020	15 990	14.05

MEDIA (%) 23.01

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (%) 6.53

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.28

A. 9 Módulo de ruptura de las piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	CARGA (kg)	f_r (kg/cm ²)
16	1 150	34.93
9	1 050	31.89
7	1 050	31.89
10	950	28.85
15	900	27.33

MEDIA (kg/cm ²)	30.98
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm ²)	2.96
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0.10

A. 10 Módulo de ruptura de las piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	CARGA (kg)	f_r (kg/cm ²)
5	1 950	19.64
20	2 200	22.16
19	2 300	23.17
15	1 500	15.11
10	2 300	23.17

MEDIA (kg/cm ²)	20.65
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm ²)	3.42
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0.17

A. 11 Peso volumétrico de las piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	W _s (g)	ANCHO (cm)	ALTURA (cm)	LONGITUD (cm)	Y (kg/m ³)
5	4 489	13.83	9.90	27.80	1 180
9	4 875	13.93	9.90	27.80	1 270
13	4 719	13.90	9.90	27.83	1 230
17	4 720	14.10	10.00	27.87	1 200

MEDIA (kg/m³) 1 220

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/m³) 39.16

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.03

A. 12 Peso volumétrico de las piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	W _s (g)	ANCHO (cm)	ALTURA (cm)	LONGITUD (cm)	Y (kg/m ³)
1	13 720	15.07	19.87	39.90	1 150
7	13 120	15.03	19.97	39.87	1 100
12	12 650	15.17	19.73	40.07	1 050
17	14 020	15.00	19.87	39.83	1 180

MEDIA (kg/m³) 1 120

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/m³) 57.15

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.05

A. 13 Resistencia a compresión de cubos de mortero.

ESPÉCIMEN	CARGA (kg)	LADO A (cm)	LADO B (cm)	RESISTENCIA (kg/cm ²)
9	3 600	5.0	4.9	146.94
10	2 250	5.1	5.0	88.24
11	3 600	5.0	5.1	141.18

MEDIA (kg/cm²) 125.45

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm²) 32.36

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.26

APÉNDICE B – ENSAYE DE PILAS Y MURETES

B. 1. Ensaye de pilas construidas con piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	CARGA MÁXIMA (kg)	f_m (kg/cm ²)	ESBELTEZ	f_m corregida (kg/cm ²)
PT-1	35 688.07	91.99	4.12	92.57
PT-2	27 033.64	69.68	4.19	70.34
PT-3	28 685.02	73.94	4.13	74.43

MEDIA (kg/cm ²)	79.11
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm ²)	11.83
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0.15

B. 2. Módulo de elasticidad de pilas construidas con piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	σ_1 (kg/cm ²)	σ_2 (kg/cm ²)	ϵ_2 (cm/cm)	E_m (kg/cm ²)
PT-1	1.27	36.80	0.0011	32 712.22
PT-2	0.93	27.87	0.0011	25 750.26
PT-3	1.38	29.58	0.0008	36 279.57

MEDIA (kg/cm ²)	31 580.68
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm ²)	5 355.08
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0.17

B. 3. Ensaye de pilas construidas con piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	CARGA MÁXIMA (kg)	f_m (kg/cm ²)	ESBELTEZ	f_m corregida (kg/cm ²)
PB-1	35 086.65	58.32	4.63	60.15
PB-2	37 329.26	62.05	4.57	63.82
PB-3	32 335.37	53.75	4.63	55.43

MEDIA (kg/cm ²)	59.80
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm ²)	4.20
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0.07

B. 4. Módulo de elasticidad de pilas construidas con piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	σ_1 (kg/cm ²)	σ_2 (kg/cm ²)	ϵ_2 (cm/cm)	E_m (kg/cm ²)
PB-1	1.21	23.33	0.0008	28 456.73
PB-2	1.17	24.82	0.0008	31 643.38
PB-3	1.83	21.50	0.0008	28 079.46

MEDIA (kg/cm ²)	29 393.19
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm ²)	1 957.83
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	0.07

B. 5. Ensaye de muretes construidos con piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	CARGA MÁXIMA (kg)	v_m (kg/cm ²)
MT-1	8 562.69	7.46
MT-2	4 872.58	4.20
MT-3	4 475.03	3.85
MT-4	7 410.81	6.41

MEDIA (kg/cm²) 5.48

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm²) 1.74

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.32

B. 6. Módulo de cortante de muretes construidos con piezas de tabicón.

ESPÉCIMEN	T₁ (kg/cm ²)	T₂ (kg/cm ²)	Y₂ (cm/cm)	G_m (kg/cm ²)
MT-1	0.59	2.98	0.0003	10 731.01
MT-2	1.01	1.68	0.0001	13 717.48
MT-3	0.20	1.54	0.0003	5 744.64
MT-4	1.26	2.56	0.0001	81 697.32

MEDIA (kg/cm²) 27 972.61

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm²) 35 967.16

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 1.29

B. 7. Ensaye de muretes contruidos con piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	CARGA MÁXIMA (kg)	v_m (kg/cm ²)
MB-1	10 703.36	8.07
MB-2	5 942.92	4.46
MB-3	7 652.40	5.74
MB-4	11 738.02	8.78

MEDIA (kg/cm²) 6.76

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm²) 2.01

COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.30

B. 8. Módulo de cortante de muretes contruidos con piezas de block de concreto ligero.

ESPÉCIMEN	T₁ (kg/cm ²)	T₂ (kg/cm ²)	Y₂ (cm/cm)	G_m (kg/cm ²)
MB-1	1.40	3.23	0.0001	53 823.04
MB-2	1.02	1.78	0.0001	18 498.47
MB-3	1.20	2.29	0.0001	23 424.21
MB-4	0.90	3.51	0.0002	21 102.38

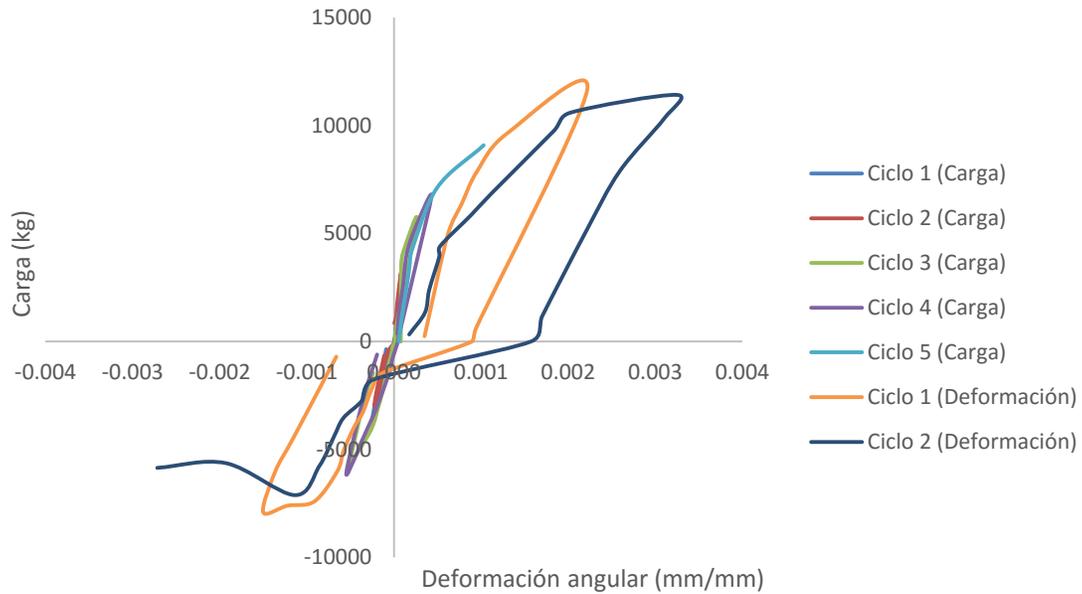
MEDIA (kg/cm²) 29 212.03

DESVIACIÓN ESTÁNDAR (kg/cm²) 16 530.25

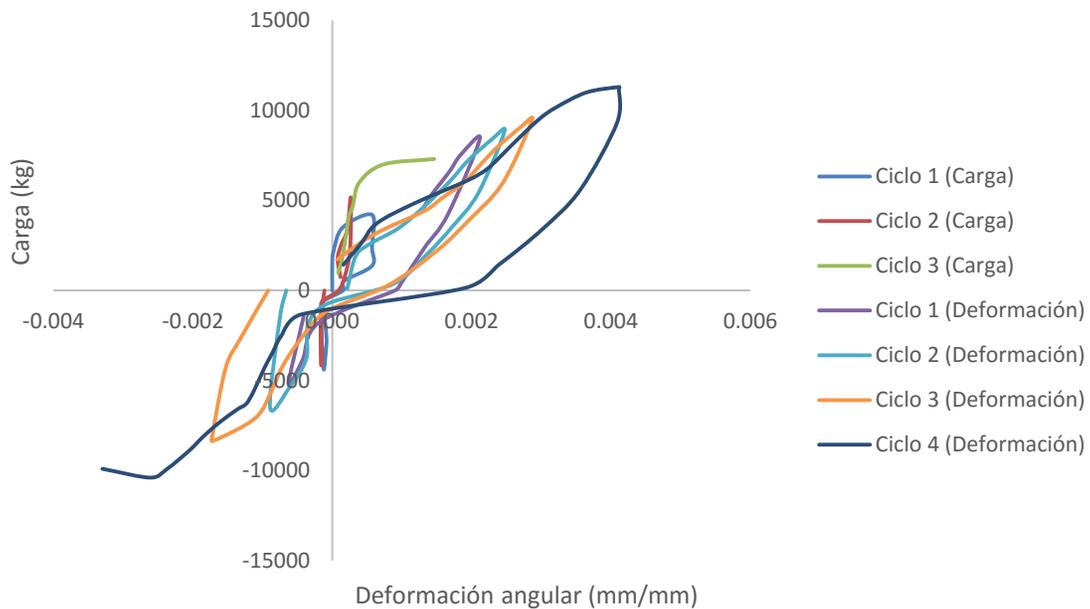
COEFICIENTE DE VARIACIÓN 0.57

APÉNDICE C – CURVAS DE HISTÉRESIS

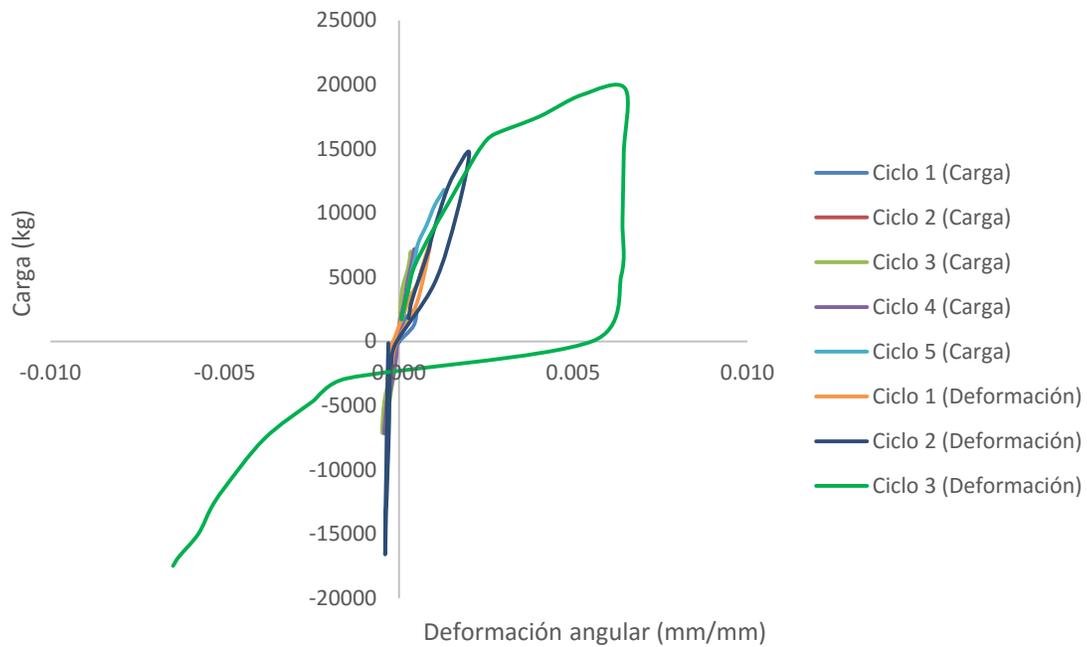
C. 1. Curvas de histéresis de muro testigo sin refuerzo construido con piezas de tabicón.



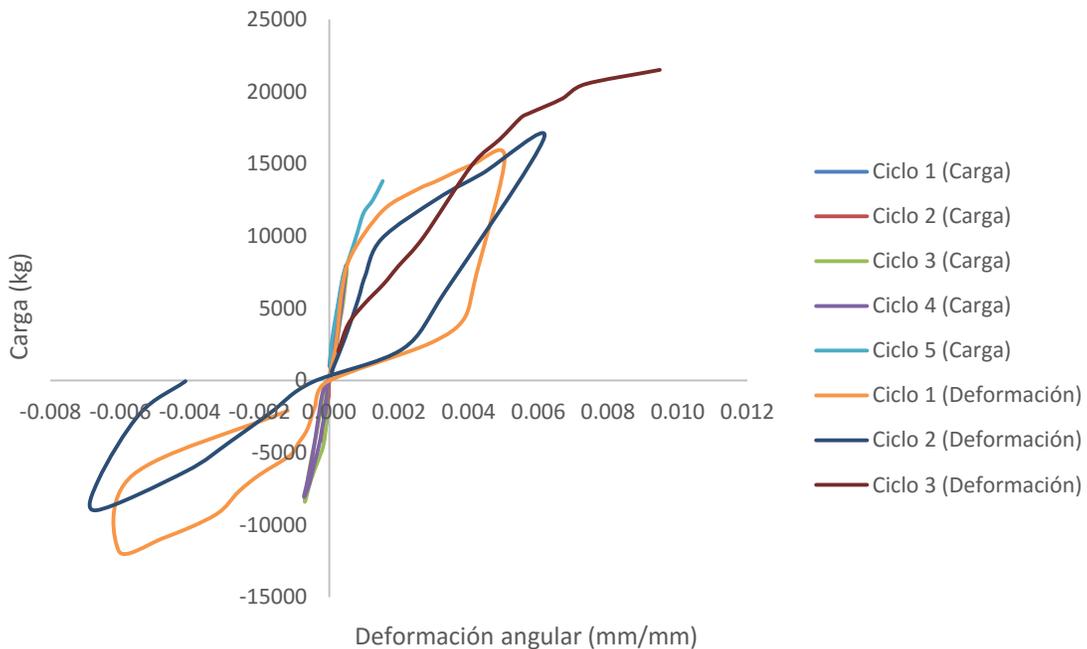
C. 2. Curvas de histéresis de muro testigo sin refuerzo construido con piezas de block de concreto ligero.



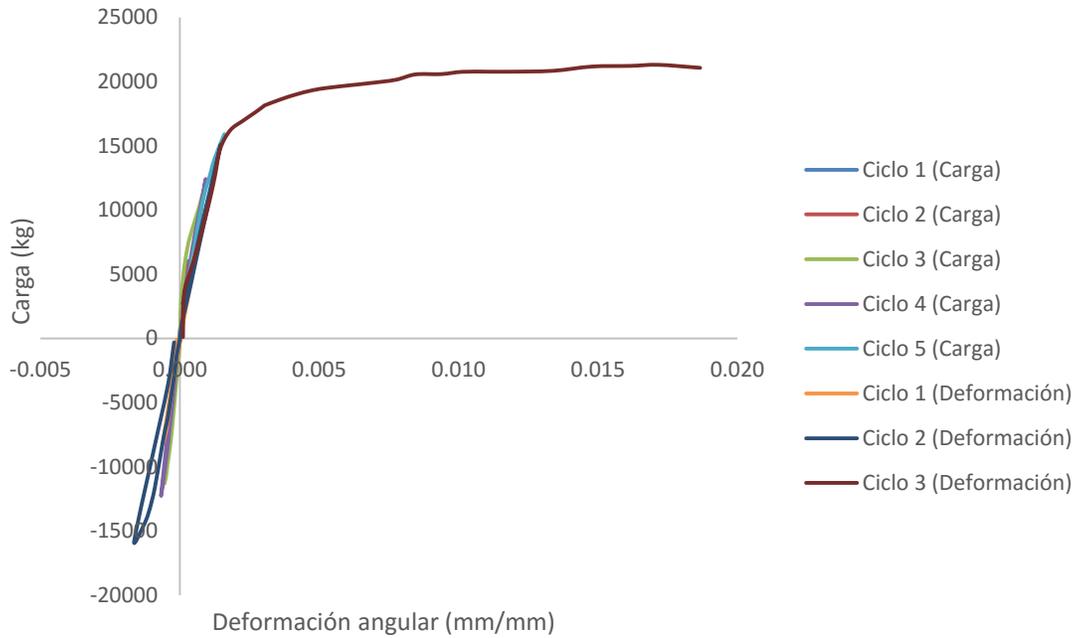
C. 3. Curvas de histéresis de muro testigo rehabilitado construido con piezas de tabicón.



C. 4. Curvas de histéresis de muro testigo rehabilitado construido con piezas de block de concreto ligero.



C. 5. Curvas de histéresis de muro reforzado construido con piezas de tabicón.



C. 6. Curvas de histéresis de muro reforzado construido con piezas de block de concreto ligero.

